

中国人民大学硕士研究生系列教材

系统科学精要

● 苗东升 著

中国人民大学出版社

中国人民大学硕士研究生系列教材

系统科学精要

● 苗东升 著

中国人民大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

系统科学精要/苗东升著.

北京: 中国人民大学出版社, 1998

ISBN 7-300-02576-5/G · 389

I. 系…

I. 苗…

II. 系统科学

IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 03280 号

中国人民大学硕士研究生系列教材

系统科学精要

苗东升 著

出版发行: 中国人民大学出版社

(北京海淀路 157 号 邮编 100080)

经 销: 新华书店

印 刷: 北京市丰台区丰华印刷厂

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 12.75 插页 1

1998 年 5 月第 1 版 1998 年 5 月第 1 次印刷

字数: 316 000

定价: 18.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

总 序

在中国人民大学,很早就有过组织编写研究生教材的动议。但那时,研究生的课程体系尚欠规范。不仅各类课程基本上按二级学科(专业)设置,口径偏窄,同一一级学科甚或二级学科(专业)的课程;差异亦很大。而且,有些课程,也与本科阶段拉不开档次,教学内容重复。所以,编写研究生教材这项直接关系到研究生培养质量的基础性工作,只是在某些学科或专业做过尝试,并未提上整个学校的议事日程。

1996年4月召开的国务院学位委员会第十四次会议,是我国研究生教育的一个重大转折点。在那次会议上,明确提出了“以提高质量为中心”的研究生教育工作思路,并且,根据培养跨世纪的复合型人才的需要,相应调整了研究生学科专业目录。以此为契机,从1997年起,我们对硕士研究生课程体系进行了较大规模的改革:(1)适当加大课程教学在整个硕士研究生培养过程中的比重。(2)将本科、硕士、博士三个培养阶段的课程设置作为一个系统,通盘考虑,拉开档次。按照硕士研究生的培养目标设置课程,确定教学内容。(3)本着“宽口径,厚基础”的原则,拓宽硕士研究生的知识领域,在各个一级学科内设置所有专业通开的核心课程——学科基础课。(4)统一课程设置标准,建立一套由公共课、学科基础课、专业课和选修课等四个类别组成的规范化课程体系。

打下了较为规范化的课程体系这个基础,我们即着手组织编

写硕士研究生系列教材。所编教材的重点是：全校所有学科通开的公共课教材以及分别在各个一级学科通开的学科基础课教材。现在，呈现在读者面前的，便是我们组织编写的第一批硕士研究生教材。

编写研究生教材，本来就是一件新鲜事物。编写建立在规范化的课程体系基础上的硕士研究生公共课和学科基础课教材，难度就更大了。因此，我们迈出的这一步，既具有探索性，又具有深远的意义和影响。当然，我们深知，这一批以及今后陆续出版的硕士研究生教材，肯定存在着这样或那样的不足之处，还需在使用过程中不断充实、完善。我们也深信，只要方向明确，经过一个时期的努力，我校的研究生课程体系和教材建设将会日臻成熟。

中国人民大学研究生教材工作委员会

1998年3月22日

目 录

第 1 章 系统科学论	1
1.1 有待深入研究的课题	1
1.2 系统科学的对象和特点	3
1.3 系统科学的体系结构	8
1.4 系统科学与其他学科的关系.....	12
1.5 系统科学的孕育和产生.....	16
1.6 系统科学的意义和地位.....	19
1.7 建设系统科学的中国学派.....	21
第 2 章 系统的一般理论	26
2.1 系统 元素 非系统.....	26
2.2 整体突现原理.....	29
2.3 系统的结构.....	32
2.4 等级层次原理.....	35
2.5 系统的环境.....	37
2.6 系统的行为和功能.....	40
2.7 系统环境互塑共生原理.....	43
2.8 系统的秩序.....	45
2.9 系统的演化.....	47
第 3 章 动态系统理论	51
3.1 状态 状态变量 控制参量.....	51
3.2 静态系统与动态系统.....	55

3.3	轨道 初态与终态 暂态与定态	58
3.4	稳定性	62
3.5	目的性与吸引子	68
3.6	分叉	72
3.7	突变	77
3.8	回归性与非游荡集	81
3.9	瞬态特性与过渡过程	83
第4章	线性系统理论	86
4.1	线性关系	86
4.2	线性系统	89
4.3	线性系统的动态行为描述	92
4.4	线性系统的相图	96
4.5	线性系统的平庸行为	98
第5章	非线性系统理论	102
5.1	非线性特性	102
5.2	非线性系统	107
5.3	非线性系统的动态行为描述	109
5.4	非线性系统的稳定性	111
5.5	非线性系统的相图	114
5.6	非线性系统的吸引子	115
5.7	非线性系统的自激振荡	117
5.8	非线性系统的非平庸行为	119
第6章	随机系统理论	122
6.1	随机性	122
6.2	随机系统	125
6.3	估计理论	127
6.4	随机稳定性	130
第7章	自组织系统理论	133

7.1	概述	133
7.2	自组织类型	135
7.3	自组织判据	136
7.4	自组织原理	138
7.5	自组织的描述方法	142
7.6	自创生	144
7.7	自生长	150
7.8	自适应	155
7.9	自复制	161
第 8 章	他组织系统理论	165
8.1	组织 自组织 他组织	165
8.2	他组织原理	167
8.3	他组织系统的动力学方程	171
8.4	他组织系统的动力学特性	177
8.5	能控性与能观性	181
第 9 章	混沌系统理论	184
9.1	典型系统	184
9.2	以分形几何描述的动力学特性 奇怪吸引子	189
9.3	非周期定态	195
9.4	对初值的敏感依赖性	196
9.5	确定性随机性	199
9.6	长期行为的不可预见性	201
9.7	混沌序：貌似无序的高级有序性	203
9.8	通向混沌的道路	206
9.9	他组织混沌	207
第 10 章	开放的复杂巨系统理论	214
10.1	复杂性研究概述	214
10.2	系统的新分类	217

10.3	巨系统	219
10.4	复杂巨系统	222
10.5	开放的复杂巨系统	225
10.6	复杂性的定义	228
10.7	综合集成方法	229
10.8	研讨厅体系	232
10.9	建立系统学的新思路	234
第 11 章	信息学	238
11.0	系统技术科学的新划分	238
11.1	什么是信息	240
11.2	信息量	242
11.3	信息熵	246
11.4	通信系统	249
11.5	噪声	255
11.6	广义信息 全信息	257
11.7	信息的特征与实质	261
11.8	信息技术	264
11.9	信息与系统	267
第 12 章	控制学	271
12.1	系统与控制	272
12.2	控制任务	274
12.3	控制方式	277
12.4	控制系统的数学描述	282
12.5	控制系统的性能指标	285
12.6	随机控制	289
12.7	自组织控制	291
12.8	大系统控制	294
12.9	控制技术	298

第 13 章 事理学	301
13.1 从物理到事理	302
13.2 事理通论	304
13.3 事理学与运筹学的划分	308
13.4 事理学方法论	311
13.5 事理运筹	314
13.6 事理模拟	316
13.7 事理过程	319
第 14 章 运筹学	323
14.1 运筹学方法论	323
14.2 线性规划	326
14.3 非线性规划	330
14.4 动态规划	331
14.5 排队分析	334
14.6 对策分析	336
14.7 决策分析	340
14.8 网络分析	342
14.9 库存分析	344
第 15 章 模糊学	348
15.1 精确方法的局限性	348
15.2 模糊性与模糊方法	351
15.3 模糊集合	353
15.4 模糊关系与模糊推理	359
15.5 模糊截割理论	364
15.6 模糊控制	366
15.7 模糊运筹和模糊综合评判	369
15.8 模糊聚类分析	372
15.9 模糊模式识别	373

第 16 章 系统工程	376
16.1 组织管理的技术.....	376
16.2 部门系统工程.....	377
16.3 系统工程方法论.....	379
16.4 工程计划的统筹方法.....	382
16.5 实施系统工程的系统——总体设计部.....	384
16.6 综合集成工程.....	387
 主要参考书目	 392
后记	393

第 1 章 系统科学论

系统思想的突出特点是强调整体性。用之于系统科学本身,就是强调对这一学科作整体的认识和把握,不可停留于对各个分支学科的了解,而应把系统科学当作由这些分支构成的完整系统。本书第一章的任务就是对系统科学作一整体的说明。

1.1 有待深入研究的课题

经过近 20 年的评介、研究和应用,系统思想和方法已在相当程度上融入我国自然科学、社会科学、工程技术、经营管理以及其他领域广大工作者的知识结构中。从社会大众到国家领导人,从学术刊物到文学作品,都在使用系统、信息、系统工程、自组织之类术语。尽管歧见尚存,系统科学作为一门一级学科的地位已基本确立,为越来越多的人所认同。

从 1978 年起,在钱学森的带领和推动下,我国学者按科学学观点对系统科学的各个方面进行研究,涉及学科命名、定义、特点、研究对象、体系结构、产生发展的背景和道路、与其他学科的关系、在现代科学技术总体系中的地位、对社会发展的影响等理论问题。由此开辟的研究领域,可称为系统科学论。^①与 60 年代以来国外同行的同类工作相比,国内系统科学论研究的规模之

^① 参见朴昌根:《系统科学论》,西安,陕西科学技术出版社,1988。

大、涉猎之广、探讨问题之深，都处于领先地位。通过这些工作，厘清了系统研究不同分支学科的界限，清除了国外学者的混乱认识，使系统科学成为一个具有明确含义的概念，有力地推动了这一学科的发展。正是这些工作导致协同学创始人哈肯的如下评论：“系统科学的概念是由中国学者较早提出的，我认为这是很有意义的概括，并在理解和解释现代科学，推动其发展方面是十分重要的”^①，“中国是充分认识到了系统科学巨大重要性的国家之一”^②。

钱学森在这方面的主要贡献有三点：其一，他是我国系统科学论研究的发动者和带头人，提供了持续的推动；其二，他是这一研究中主要思想观点的提出者；其三，他提出了系统科学论的研究方法。早在 80 年代初，钱学森在倡导用科学学观点考察现代科学技术时，提出学科学和学科体系学的概念，强调用系统观点研究问题。1991 年，进一步概括出“学科系统观点”^③的概念。这些工作在我国学术界产生了深远的影响。

然而，系统科学毕竟还很年轻，真正的历史不过 30 来年，以至人们至今仍难于把握其学科特性。系统科学论研究依然见仁见智，真知灼见与似是而非的观点并存。有些学者对“我国系统科学界的泛泛而论的状况”深表担忧。有的学者批评“系统科学本身并不系统”，甚至认为十多年的系统研究是“术语大战”。有的学者断言“系统科学是一个含糊的概念”，提到系统科学时常常在前面加上“所谓”二字，以示对这一概念的科学性有严重的保留。这些意见中不无合理成分，应予重视，但他们明显地表现出对系统科学的误解，有很大片面性，造成新的认识混乱。

① 许国志主编：《系统科学大辞典》，序二，昆明，云南科技出版社，1994。

② H. 哈肯：《协同计算机和认知》，中译本序，北京，清华大学出版社；南宁，广西科学技术出版社，1994。

③ 钱学森致许国志的信，载《系统工程理论与实践》，1993（2）。

英国学者 P. 切克兰德提出的“软”系统方法论是对系统研究的重要贡献，本书第 13 章有所论述。切氏对系统科学论的研究也颇关注。他认为，科学文献中的系统一词有两种含义，一是可观察的、作为复杂整体的对象实体，一是用来感知、整理和表示人们对这些实体的认识的抽象概念。他把系统科学研究中的概念混乱归结为未能区分这两种不同用法。^①他的看法并未切中要害。原则上说，一切概念都是用来感知、整理和表示人们对实体对象认识活动的观念形态工具，并非系统科学独有的现象。切克兰德未能抓住西方系统研究存在混乱的根源，依据他的方案无法建立系统科学的学科体系。

系统科学论的研究有待深入，有必要依据近年来的发展情况，对学术界出现的新混乱加以分析和清理，回答大家关心的若干理论问题。因此，在阐述本学科的基本内容之前先来做这一工作是必要的。从自组织观点看，系统进化离不开系统自我评价和环境对系统的评价活动，通过不断评价而选择前进方向。系统科学论研究就是系统科学发展所必须的评价活动。

1.2 系统科学的对象和特点

按照钱学森的观点，各门科学都以客观世界为研究对象，依据对象来划分学科门类的传统方法不科学。在终极的意义上，我们必须接受这一观点。不过，“横看成岭侧成峰，远近高低各不同”。观察小小庐山尚且如此，研究无限多样复杂的客观世界，更须从不同的视角去观察。如物质运动的角度，数量关系的角度，等等。从不同角度观察同一对象世界，进入观察者视野的现象和事实便不同，从而形成不同的知识体系，即不同的学科门类。钱学

^① P. 切克兰德：《系统论的思想与实践》，北京，华夏出版社，1990。

森指出,从系统的角度观察客观世界所建立起来的科学知识体系,就是系统科学。这是把系统科学与自然科学、社会科学、思维科学等学科区分开来的基本标志。

但在非终极的意义上,我们可以而且需要从研究对象上区分不同学科,给系统科学以进一步的界定。贝塔朗非是最早使用系统科学这个概念的学者之一,他把这个学科定义为:“关于‘系统’的科学”^①。克勒给出进一步的表述:系统科学“指向的是关于系统的具有普遍意义的现象”,“处理的是系统问题”^②。概言之,系统科学是以系统现象、系统问题为研究对象的学科。前述钱学森的定义也包含这一思想。

什么是系统现象或系统问题?黄琳提出的概念“系统意义”^③有助于回答这个问题。我们知道,物理学只研究具有物理意义的问题”,生物学只研究具有生物意义的问题,经济学只研究具有经济意义的问题,等等。“某某学科只研究具有某某意义的问题”,应当作为一条科学学原理。应用于我们讨论的范围,结论是:“系统科学只研究具有系统意义的现象或问题”。所谓系统现象或系统问题,就是具有系统意义的现象或问题。

什么是系统意义?这个概念联系着另一概念——系统性。不可把系统性与整体性当作一回事。按照贝塔朗菲的观点,整体性、秩序性、组织性、目的性、演化性等等,都属于系统性范畴。一切呈现系统性的现象,都是具有系统意义的现象。在现实生活和理论探讨中,凡着眼于处理部分与整体、差异与统一、结构与功能、自我与环境、有序与无序、合作与竞争、行为与目的、阶段

① 贝塔朗菲:《普通系统论的历史和现状》,载《科学学译文集》,北京,科学出版社,1980。

② G. J. 克勒:《信息社会中二维的科学出现》,载《哲学研究》,1991 (9)。

③ 《北京大学系统科学研讨会纪要》,载《北京大学学报(哲学社会科学版)》,1989 (2)。

与全过程等相互关系的问题，都是具有系统意义的问题。或者说，凡需要处理多样性的统一、差异的整合、不同部分的耦合、不同行为的协调、不同阶段的衔接、不同结构或形态的转变以及总体布局、长期预测、目标优化、资源配置、信息的创生与利用之类问题，都是具有系统意义的问题。现代科学技术和工程实践的各个领域都存在大量这类问题，用系统观点分别研究它们就形成各个领域的特殊系统理论。若撇开这些问题所涉及的具体领域的特殊性质，即撇开其特有的物理意义、生物意义、心理意义或经济意义等，在纯粹系统意义（把对象仅仅作为系统）上研究，就是系统科学的内容。

还存在各种特殊类型的系统意义。控制学只研究具有控制意义的问题。信息学只研究具有信息意义的问题。运筹学只研究具有运筹意义的问题。例如，一个函数表达式和一组代数不等式本来只有数学意义，如果该函数能刻画某项事理活动的功能目标对决策变量的依存关系，那组不等式能刻画决策变量所受限制，它们就成为描述该项事理活动中规划问题的数学模型，因此具有运筹意义。控制意义、信息意义、运筹意义，都是特殊形式的系统意义。系统科学每个分支都揭示出一类特殊的系统意义，以具有那类系统意义的问题为研究对象。被研究的问题和所使用的概念、原理、方法是否具有系统意义，是区分系统科学与其他学科的重要依据。

强调系统意义还有其他现实背景。系统科学越来越重视使用数学工具，用数学模型表示系统问题，给出精确解。这是系统科学走向成熟的必由之路。但同时也出现单纯追求数学工具的高深漂亮、忽视问题的实际背景和经验含义的倾向。这就要求强调系统意义。

不可把系统科学简单地看作交叉科学或边缘科学。系统现象并非只出现于某些学科的边缘或交叉地段，它普遍存在于一切学

科领域。系统科学是研究这类现象共性的学问。运用系统思想和方法研究物理问题、经济问题或其他问题，属于系统科学与物理学或经济学等的交叉领域，所建立的系统理论，严格地说，不算系统科学标准的组成部分，而是交叉科学。耗散结构论、超循环论、突变论、分形论等著名系统理论，对于系统科学的发展有重大贡献。但耗散结构论有强烈的物理学（特别是热力学）背景，超循环论有强烈的生物学背景，前者提出的超熵概念，后者提出的拟种概念，对于这些学科是不可缺少的基本概念，却不可能成为系统科学的概念。突变论和分形论是数学系统论，也不能简单地纳入系统科学。托姆的突变论与形态发生密切相关，大量内容无法纳入系统科学或数学。仅从几何角度研究分形现象的是数学科学，从系统角度研究分形的才是系统科学。这些理论对于建立系统学十分有价值，但它们本身还不是系统科学的标准组成部分。必须划清这些界限。我国近年来出版的一些权威性著作，如《中国大百科全书》的《自动控制与系统工程》卷（1991），云南科技出版社的《系统科学大辞典》（1994），把这些系统理论算作系统科学的基本组成部分，其说不当。断言耗散结构论和超循环论已“成为系统学的一个重要组成部分”^①，尤其值得商榷。这样界定的系统科学确是一个含糊概念。王雨田批评“系统科学的内涵与外延是不清楚的”^②，就是由这类提法中引发出来的。但问题出自这些著作的不正确表述，不是系统科学固有的毛病。由于是探索，钱学森的论述有时前后不一致，但就基本观点看，他是把这些系统理论当作系统学的建筑材料，并未把它们包括在他的系统科学体系中（见图 1.3）。他的表述比较严谨。坚持这一表述，系统科学

① 《中国大百科全书·自动控制与系统工程》，174、35 页，北京，中国大百科全书出版社，1991。

② 王雨田：《形成中的系统科学及其存在问题》，载《中国社会科学》，1995（4）。

的内涵和外延便基本明确了，许多混乱即可消除。

应当承认，上述系统理论分别从不同学科产生出来，大都具有作为独立学科分支存在的价值，不会因系统学的建立完全失去其价值。钱学森曾认为，建立系统学之后，这些系统理论将成为“过眼烟云”。此论不妥。例如，耗散结构论中大量关于不可逆热力学的知识，虽不能进入系统学，但仍属于物理学的内容，不会消失。耗散结构作为科学概念，不一定为系统学所吸纳，但它所包含的科学和哲学思想，仍有广泛的吸引力。

宋健提出：“我认为系统科学，恐怕不能不研究能量这个基本的运动规律。从大系统巨系统来说，系统科学应该注意研究能量平衡，能量转化动力学，要和社会科学相结合，才能得出合乎客观规律的理论 and 结论。”^①从系统科学的应用及它与自然科学、社会科学的交叉发展来看，这个意见是正确而重要的。跳出一般系统研究的小圈子，探讨物质运动、社会运动、思维运动中的系统问题，从中提炼新的系统原理和方法，是发展系统科学的重要途径。蓬勃发展的地理系统科学、生态系统科学、世界系统学等学科，对系统科学发展都有推动作用。但从系统科学的学科界定角度看，这一说法可能引起新的认识混乱。正如数学与经济学结合不再是本来意义上的数学一样，与自然科学或社会科学相结合的系统研究也不再是本来意义上的系统科学。物理学家可以从事生物物理研究，但不能以生物物理学来界定物理学，因为这将使物理学成为一个含糊概念。按物理学系统理论（如耗散结构论）或经济学系统理论（如经济系统学）来界定系统科学，同样会使系统科学成为一个含糊概念。从贝塔朗菲起，系统科学家一直主张撇开物质、能量等概念，在纯粹形态上研究系统。这个主张应当坚持。宋健的议论是从评论“研究熵的运动”引发的。尽管熵概

^① 宋健：《加强基础研究，逼近科学前沿》，载《中国软科学》，1995（4）。

念也起源于物理学，但自申农以来，熵研究早已越出自然科学范围。熵与能量有截然不同的性质。经过提炼，熵有可能成为系统学的概念。能量则不同，能量平衡、能量转化动力学属于自然科学的内容，不能成为系统学的概念。

1.3 系统科学的体系结构

70年代初，贝塔朗菲首先提出这个问题，建构了一种系统科学体系，即贝塔朗菲纲领。贝氏及其他西方学者的类似工作，对发展系统科学起了积极的作用。由于缺乏明确的学科体系思想的指导，未能把系统思想应用于学科体系研究中，他们建构的框架都不成功。

80年代初，钱学森重新提出这个课题，在明确的学科系统观点指导下，探讨现代科学的总体系和各门科学的体系结构。现代科学技术是一个庞大的知识体系，由不同门类组成。既然都是知识系统，都是从实践中总结出来的，不同的门类应当具有某种共同的体系结构。自然科学是历史最久、发育最成熟的学科。通过解剖这只“麻雀”，钱学森发现自然科学有三个层次：工程技术层次，如水利工程、电气工程等；技术科学层次，如水力学、电工学等；基础科学层次，如物理学、生物学等。自然科学又通过自然辩证法这座桥梁与哲学联系起来。图 1.1 给出它的结构模式。再考察其他学科，发现这种模式是共同的。由此提出著名的“三个层次一座桥梁”的学科体系一般框架，如图 1.2 所示。属于工程技术层次的学科提供直接用于改造客观世界的知识，技术科学层次的学科提供指导工程技术的理论，基础科学层次的学科提供指导技术科学的理论，再通过相应的哲学分论而上升到哲学层次，并接受哲学的指导。

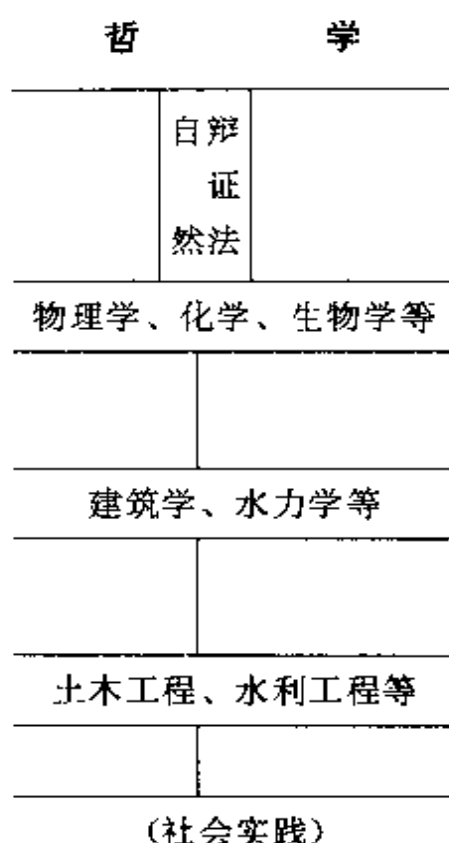


图 1.1

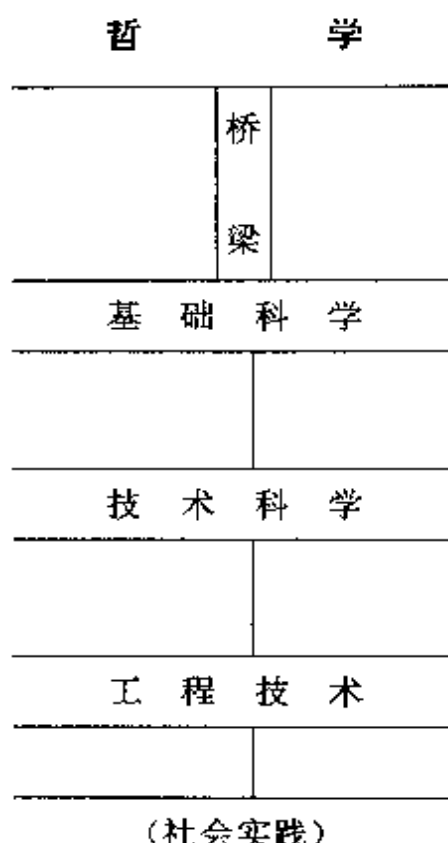


图 1.2

把这个一般框架用于系统科学，钱学森重新界定了已建立的学科分支，发现系统科学已具备工程技术（包括系统工程、自动化技术、信息技术）与技术科学（包括运筹学、控制学、信息学）两个层次，但基础科学层次仍是空白。他由此提出尽早建立系统科学体系的号召，指出关键是填补基础科学层次的空白，并把它命名为系统学（1981）。图 1.3 总结了他的这些思想。

王雨田把系统科学界定为“一门新的基础科学”，这个提法不妥。上述钱学森关于系统科学体系的论述可以消除这种混乱。系统科学是一大类学科体系，包括三个层次。谁也不能否定系统工程属于系统科学，但谁也不会承认系统工程属于基础科学。信息学、控制学、运筹学同样不是基础科学。

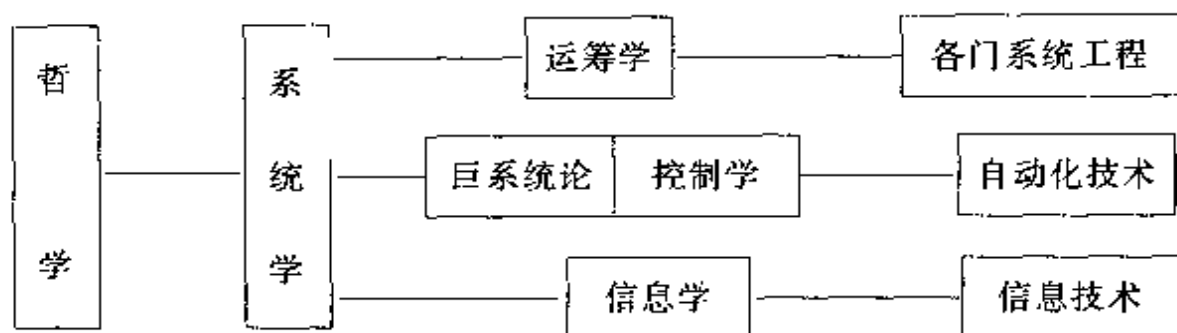


图 1.3

系统学至今尚未建立起来。只要这一事实没有改变，钱学森关于建立系统学的论述就带有某种设计性质，设计方案的科学性要经受实践的检验。在往后的发展中，每一层次都会出现新的分支。但要说“系统科学这一学科术语只能看作是学科分类设计的一种模式”（王雨田），未免缺乏根据。信息学、控制学、运筹学、系统工程等分支学科已基本成熟，并非是“一种理论假设”。建立系统学的提法也非仅仅是一种假设或设计模式。自组织理论、非线性动力学等已提供了大量构筑材料，经过多年探索，我们有理由相信系统学是可以建立起来的。朱照宣认为系统学已“处于其幼年状态”^①，更是一种乐观的看法。总之，从总体上断言系统科学尚未形成，显然不妥。正确的提法是：系统科学作为一大科学门类已经形成，但体系尚不完善。不完善的东西是处于发展中、成熟中的东西，而不是处于形成中的东西；处于幼年状态的东西是已诞生的东西，而不是尚在孕育中的东西。

钱学森的系统科学体系思想要经受学科进一步发展、特别是建立系统学的实践过程的检验，作出某些补充和修改是不可避免

^① 朱照宣：《系统学和非线性动力学》，载《复杂性研究》，北京，科学出版社，1993。

的。近年来，钱学森仍在思考这个问题，提出新的看法，主要有：

(1) 系统学是关于巨系统的理论，包括简单巨系统学和开放的复杂巨系统学等；

(2) 技术科学层次的系统科学分支一律称“学”而不称“论”，包括信息学、控制学、运筹学和事理学（详见 11.0 节）。

系统科学通向哲学的桥梁也是有待建立的新学科。把它称为系统哲学有违钱学森的学术思想。其一，钱学森讲的桥梁是马克思主义哲学的分论，与拉兹洛的系统哲学不同。其二，西方学者的系统哲学不强调基于系统科学的成果进行哲学概括，常常离开科学本身直接就客观系统现象作思辨式的概括，而钱学森讲的分论强调基于系统科学进行哲学概括。关于这个分论的命名，钱学森最常讲的是系统论，有时也讲系统观，后来又讲系统科学的哲学。我们倾向于后者。

系统科学哲学是一个广阔的研究领域。作为桥梁，有连接科学的一端，也有连接哲学的一端，桥上还可以有不同的通道。用系统论或系统观来称谓，难以看到这个领域的全貌。采用系统科学哲学的称谓可以克服这个缺点。系统科学哲学也有层次。连接科学的一端须直接对系统科学的内容进行哲学概括，主要包括系统科学辩证法、系统科学认识论、系统科学方法论等，还包括系统科学史、系统科学与科技革命、系统科学与社会等方面的研究。这些内容很难用系统论来代表。连接哲学的一端是对这些分支的进一步抽象概括，有更多的哲学思辨性。把这个子层次称为系统论或系统观更恰当些。

基于以上的讨论，可以把系统科学的体系结构用图 1.4 表示出来。

哲 学	
系统科学哲学 (桥梁)	系统论 (观)
	系统科学辩证法 系统科学方法论 系统科学认识论 系统科学史
基础科学	简单巨系统学 开放的复杂巨系统学
技术科学	信息学 控制学 运筹学 事理学
工程技术	系统工程 控制工程 信息工程
(社 会 实 践)	

图 1.4

1.4 系统科学与其他学科的关系

系统科学既不属于自然科学，也不属于社会科学，而是另一个独立的学科门类。按照观察世界的不同视角，钱学森把现代科

学划分为 11 大门类：自然科学，社会科学，数学科学，思维科学，系统科学，人体科学，行为科学，地理科学，军事科学，文艺科学，建筑科学。这就原则上说明了系统科学与其他学科的区别。按分类逻辑看，11 大门类是并列的；若就学科内容看，系统科学与其他学科都相互交叉和贯通。自然科学、社会科学、思维科学等门类是按纵向划分的学科，分别研究客观世界的不同领域。但不论自然现象或社会现象，不论行为过程或思维过程，只要是系统问题，都可以撇开具体领域的特殊性质，仅仅当作系统来研究。这就规定了系统科学的横断性，被称为横断科学。它的学科任务是为一切研究领域提供用系统观点考察对象的一般原理和方法。就横断性看，系统科学与数学相同，与自然科学、社会科学明显不同。

系统科学大量使用数学工具，有些分支甚至被视为现代数学的组成部分。现代数学渗透着鲜明的系统思想，有些分支明确宣布以系统为研究对象。这种情况容易混淆两者的界限。但它们是两种不同的横断科学，代表观察世界的两种不同角度。数学是从数量关系和空间形式的角度观察世界的学问。数学方法和系统方法都是广泛适用的横断科学方法。但有系统意义的问题不一定都有数学意义，有数学意义的问题也不一定都有系统意义。“系统思想即使不能用数学表达，或始终只是一种‘指导思想’而不是一种数学构想，也仍保持其价值。”^① 研究和解决巨型的复杂的系统问题时，尤其需要记住贝塔朗菲的这个意见。

系统科学与非线性科学、复杂性科学的关系，是当前学术界关心的突出问题。新近出现的认识混乱与此有关。线性与非线性是可以精确定义的概念，线性科学与非线性科学亦可明确划界。目前文献中谈论的非线性科学有宽、窄两种理解。广义的非线性科

① 贝塔朗菲：《一般系统论》，22 页，北京，清华大学出版社，1987。

学包括非线性力学、非线性光学、非线性经济学等。这是一大类学科的总称，不是一门科学。这样理解的非线性科学与系统科学相去甚远，易于区分。其中某些领域产生的非线性系统理论，属于系统科学与该领域的交叉学科，对发展系统科学有重要作用。狭义的理解，按谷超豪的说法，“非线性科学即是研究非线性现象共性的一门学问”^①。撇开一切具体特性（如力学特性、光学特性等等），仅仅研究非线性现象共性的学问，必定是一门横断科学。但我们认为，它不是数学和系统科学以外的另一门横断科学。这样的非线性科学包括两个分支：主要从数量关系着眼的非线性共性研究是非线性数学，主要从系统着眼的非线性研究是非线性系统理论，属于系统科学。事实上，技术科学层次的系统科学早已涉及非线性问题，建立了非线性规划、非线性控制等系统理论。基础科学层次的非线性研究尚未形成完整的理论体系。但存在这种系统理论，它们属于系统学范畴，系统学主要研究非线性系统，这是无疑的。非线性动力学已有相当丰富的成果，其中一切具有明确系统意义的概念、原理和方法，都有资格进入系统学。如稳定性理论、分叉理论、吸引子理论等，除去那些纯数学技术性的内容，都属子系统学范畴。要充分重视非线性动力学对建立系统学的价值。但也不可把非线性动力学简单地划归系统学。朱照宣认为：“对非线性动力学在系统学中的适用程度，不能寄予奢望。”^②非线性动力学主要应归于数学。

复杂性是一个难以精确定义的概念，不同学者赋予它不同含义。不能用定义自然科学、思维科学等学科的办法定义复杂性科学，因为复杂性不是观察世界的一种独特角度。按通常的学科划分原则看，复杂性科学是一个真正的“含糊概念”。但复杂性科学

① 谷超豪：《非线性现象的个性与共性》，载《科学》，1992（3）。

② 朱照宣：《系统学和非线性动力学》，载《复杂性研究》，12页。

的出现是一种历史的必然，具有重大而深远的影响。应当从科学作为整体的历史演进的观点来认识它的产生。已有 400 年历史的经典科学本质上是简单性科学，其历史使命已基本完成，取而代之的新型科学正在形成之中。可以从不同侧面描述这种新型科学，主要研究复杂性就是它的特征之一，因而称为复杂性科学。复杂性科学并非自然科学中的一个新分支，亦非与自然科学、社会科学等并列的另一门科学，而是整个科学作为演化系统的一种历史形态，一种代表未来的形态。前述广义非线性科学就是它的重要组成部分。凡能用数学描述的复杂性，必定是非线性的，非线性是产生复杂性的主要数学根源。今天，各个学科领域的主攻方向均已转向或正在转向该领域的复杂性现象，在这些领域产生的新学科只能是复杂性科学。复杂性科学不等于系统科学，但系统科学本质上属于复杂性科学，它的任务是向复杂性研究提供方法工具。复杂性现象必定是系统现象，必须从整体上把握，用系统方法处理。

系统科学与哲学的关系一直是学术界关心的热门话题。大多数学者肯定两者有密切联系。冀建中提出一种独特见解，认为系统科学的出现“向哲学的思辨领域又发动了一次进攻。哲学在这时是采取拿来的态度还是采取退出的态度呢？拿来实际是一种保守的办法，退出倒是一种积极的态度”^①。对于 80 年代的系统热进行反思，提出拿来（进入）与退出的关系问题，是新鲜而有益的。但进入与退出是一对辩证矛盾，有退出就有进入。系统科学是“系统思想由哲学变成了科学”^②的产物，标志着哲学在实证知识层次上退出系统研究，同时也就为哲学研究提供了从科学思想和方法论层次进入系统研究的必要性和可能性，开辟出新的哲学园地。不应当也不可能要求哲学从一切层次上都退出去。各种系统

① ② 冀建中：《对“系统热”的一点反思》，载《理论信息报》，1985-05-01。

理论的创立和发展都需要哲学的启迪，帮助它们解开谜团，克服理论困难。著名系统理论家贝塔朗菲、普利高津、哈肯和钱学森等人对此都有明确的论述。

何祚庥批评我国学术界把系统方法“照抄照搬”于哲学社会科学，认为“现在人们所说的系统科学又常常包括系统哲学或系统社会学”^①。这是他断言系统科学作为一个“含糊概念”的重要依据。系统哲学属于系统科学通向哲学的桥梁，系统社会学（如果存在）属于系统科学与社会学的交叉领域，都不是系统科学的标准组成部分，不能按照它们来界定什么是系统科学，正如不能按自然辩证法来界定自然科学、按技术社会学来界定社会学一样。这些混乱的提法来自某些学者对系统科学的误解，并非证明系统科学是含糊概念的事实依据。把物理学方法照抄照搬于哲学社会科学的错误不能由物理学负责，把系统方法照抄照搬于哲学社会科学的错误也不能归罪于系统科学。

1.5 系统科学的孕育和产生

许国志、顾基发等人指出：“任何一门学科，只有当它是所处时代的社会生存与发展客观需要的自然产物，同时学科内在逻辑必要的前期预备性条件又已基本就绪时，它才会应运而生，并为世所容所重，得以充分发展。”^② 系统科学的历史充分体现了这一点。

信息学的渊源应追溯到 19 世纪发明电报和电话。电信技术的实践提出大量需要从理论上回答和进行定量计算的问题，把信息

① 何祚庥：《研究复杂性科学的若干方法论问题》，载《复杂性研究》，9 页。

② 许国志、顾基发、范文涛、经十仁：《系统工程的回顾与展望》，载《系统工程理论与实践》，1990（6）。

技术与数学、物理学、工程学联系起来，出现了对信息问题的早期研究。哈特莱、奈魁斯特等人在 20 世纪 20 年代的工作，是信息学的重要前期性知识准备，统计信息概念就是这个时期萌发的。现代概率论和统计力学的建立，统计方法走向成熟，为申农的统计信息理论提供了必要的理论工具。

控制学的渊源要追溯到瓦特蒸汽机调速器对自动调节技术的应用。蒸汽机的广泛使用所促成的大机器工业带来对自动化技术的社会需求，也产生了对控制理论的需求。它直接导致麦克斯韦对调速器稳定性的数学分析，开辟了关于自动控制理论研究的先河。彭加勒的微分方程定性理论，李亚普诺夫的稳定性理论，统计力学，等等，为控制学提供了必要的理论工具。20 世纪 30 年代形成的伺服系统理论，对早期控制工程作了理论总结。电工学贡献了反馈概念。在这些知识准备基础上，才可能有维纳的控制论 (Cybernetics)。

运筹学和系统工程的渊源应追溯到 19 世纪末出现的垄断性大企业对经营管理技术的需求。工业生产管理的需求产生了泰勒制，电话拥挤问题启示爱尔朗对排队现象的理论探索，兰彻斯特的作战方程研究首开作战模拟学的先河。20 世纪 30 年代在经济发展推动下，出现了列昂捷夫的投入产出模型，以及康托洛维奇关于工业生产组织和计划问题的研究，成为线性规划的雏形。这些工作不仅积累了大量运筹学知识，更重要的是证明应用自然科学和数学方法解决管理问题是可行的。

最强大的动力来自战争的需要。第二次世界大战是定量化系统理论和工程技术发展的里程碑。战胜法西斯的需要把一大批有才干的科学家吸引到这些领域。申农对通信技术的研究，维纳对自动技术的研究，使他们积累了丰富的实践经验，去消化、总结和发展前人的工作，建构信息学和控制学的理论框架。一些科学家从事拟定和评价作战计划、改进作战技术以及装备的使用方法等研究，

直接形成军事运筹学；再经过战后向民用部门的推广和理论总结，形成一般运筹学。第一批系统技术科学就是这样产生的。

在基础理论方面，20 世纪以来，物理学、生物学、心理学、社会学等领域同时提出大量系统问题，要求克服还原论的局限性，转变思维方式，建立相应的基础理论。贝塔朗菲的一般系统理论就是适应这种需要而产生的。

信息学与信息技术，控制学与控制技术，运筹学与系统工程，这些学科一经产生就在社会生活各方面造成巨大影响，深刻地改变了现代社会的方方面面。这反过来又成为推动系统研究发展的强大力量。战后的每一个十年都有重要发展，都有新的系统理论出现。70 年代前后更是一个迅猛发展时期，重大进展有三。其一，以理论自然科学和数学的最新成果为依托，出现了一系列基础科学层次的系统理论，使系统研究真正走出工程技术和技术科学的范围，为建立系统学提供了知识准备。其二，围绕解决环境污染、能源匮乏、人口爆炸等世界性危机，开展了一系列重大交叉课题研究，使系统研究与人类社会各方面紧密联系起来，成为建立整体上描述世界的新理论框架——系统科学的强大推动力。其三，提出建立系统科学体系的问题，实现了系统科学从分立到整合的发展，其中又包括三次重大努力。第一次整合工作是贝塔朗菲进行的，试图按他的框架把五花八门的系统研究综合为一门统一的学科。第二次整合工作是哈肯进行的，虽然他当时尚未接受系统科学这个提法，但哈肯明确提出要把相关研究统一起来，试图以协同学为基础实现之。第三次努力归功于钱学森，他的体系结构的提出标志着系统科学实现了从分立到整合的发展。

系统科学究竟形成于何时？目前有两种不同看法。一种观点认为，系统科学产生于 40 年代，根据是目前已有的系统科学分支大多产生于那个时期。另一种观点认为，系统科学产生于 70 年代，因为只有到 70 年代才确立了系统科学这个概念（系统科学这一术

语至迟在 60 年代中期已出现), 明确了它的体系, 并出现了一批基础科学层次的系统理论, 初步具备了建立系统学的条件。应当说, 两种观点都有道理, 原则上都无不当之处。若把系统科学也看作一个系统, 凡系统都有结构, 那么, 我们更倾向于后一说法。40 年代产生了该系统的一批“构件”, 但尚未组织成为一个有机整体。到 70 年代, 不但构件进一步齐全完善, 而且形成初步的结构框架, 作为一种知识系统的系统科学在整体上算是形成了。这是由从贝塔朗菲到钱学森的诸多学者共同完成的。

1.6 系统科学的意义和地位

系统科学的产生不仅意味着现代科学总体系中又增加了一大门类, 而且关联着一场科学革命。这里所说的不是发生于某一学科领域的革命, 而是指科学作为整体的历史性大转折, 即从经典科学(机械论科学)向新型科学(似可称为有机论科学)的历史性转变。系统科学是这场大革命的重要方面。

系统科学是科学重新统一的历史需要。古代科学是综合的学问, 关于自然、社会、人自身的知识统一包容于哲学母体中。现代科学是分科的学问, 它沿着不断分支化、专门化的道路演进, 形成分支林立的庞大体系, 同时也造成不同分支相互隔离、难于沟通的局面。到 20 世纪中叶, 这种发展模式已走到自己的顶峰, 弊病日趋明显, 出现了科学重新统一的历史需要。各分支学科在对自己对象领域的中心部分充分研究之后, 必然要向与其他学科接壤的边缘地段拓展, 导致边缘科学、交叉科学纷纷出现。原本分明的学科界限模糊了, 不同领域相互过渡的道路打通了, 科学逐渐演变成为一个在任何一处都没有鸿沟的整体。现代社会日趋大型化、复杂化, 出现了大工业、大农业、大经济、大军事、大政治、大科学、大教育、大文化等等。任何一个大型复杂问题的解决都

不能由某一学科单独完成，必须综合应用多学科知识，进行跨学科研究。跨学科研究促使不同学科在更深层次上交叉和沟通。系统科学的分支学科几乎都是这种跨学科研究的产物。大型化、复杂化的突出后果，是社会生活的各方面都离不开大规模的规划、组织、协调，必须有相应的科学理论和技术方法。科学重新统一并非取消学科划分、回到古代科学的状况，分支化还会存在，新的学科将继续产生。但不同学科的相互沟通、交叉、渗透和综合将成为主要趋势，新学科大多是综合性科学。重新统一的科学作为一种系统，要求有一种能把现有按纵向划分的学科沟通连缀起来的横断科学，提供不同学科都适用的概念、原理和方法，使科学在整体上具有纵横交错的网络结构。系统科学就是这种横断科学，它的科学使命是使新型科学成为一个按多维网络结构组织起来的复杂巨系统。形成中的新型科学是跨科的学问。

系统科学是科学思维方式转变的产物。近代自然科学（经典科学的早期形态）是以形而上学思维方式（体现于机械论的自然观、科学观和方法论中）取代古代直观辩证思维（包括系统思维）方式的结果。形而上学取得支配地位的“重大的历史根据”^①，也是系统科学不能与近代自然科学同步产生的重大的历史根据。从19世纪中叶起，以一系列自然科学的伟大发现为突破口，开始了科学向辩证思维复归的历史进程，并在20世纪中叶达到高潮。^②它体现在各个方面：从孤立地研究对象转向在相互联系中研究，从用静止的观点观察事物（存在的科学）转向用动态的观点观察事物（演化的科学），从强调用分析的、还原的方法处理问题转向强调整体地处理问题，从研究外力作用下的运动转向研究事物由于内在非线性作用导致的自组织运动，从实体中心论转向关

① 《马克思恩格斯选集》，2版，第4卷，240页，北京，人民出版社，1995。

② 参看拙著《系统科学辩证法》，导论，济南，山东教育出版社，1998。

系中心论，从排除目的性、秩序性、组织性、能动性等概念转向重新接纳这些概念，从偏爱平衡态、可逆过程和线性特性转向重点研究非平衡态、不可逆过程和非线性特性，从否定模糊性转向承认模糊性，等等。这些变化都归结为要求建立系统科学。

系统科学是建设信息社会的智力工具。系统科学的出现不仅是一种思想文化现象和科学内在逻辑的必然结果，还有深厚的社会历史根源。克勒提出并讨论了系统科学在信息社会中的重要意义。他的一些具体提法，如认为经典科学是以实验为基础的一维科学，系统科学是以理论为基础的科学，代表科学的第二维度，等等，尚待推敲。但克勒站在社会转型的高度考察问题，很有见地。“这一新型社会的突现和发展始终同计算机（或信息处理）技术以及与此相联系的智力发展，如控制论、一般系统论、信息论、决策分析和人工智能等密切相关。”^①仅仅从通信工程、控制工程、经营管理的需要来说明信息技术、自动化技术、系统工程以及相关系统理论的产生，是浮浅的。信息技术、自动化技术、系统工程是建设信息社会必需的基本技术，信息学、控制学、运筹学、事理学和系统学是建设信息社会必需的科学理论。社会信息化的另一面是世界系统化、全球一体化，系统科学则是世界系统化的观念形态表现。要理解世界社会形态如何演化（如何从工业社会向信息社会的转变），国际政治和经济秩序如何变革（如冷战结构的解体），如何设计信息社会的方方面面，顺利实现社会的转型，都需要从系统科学中寻找思路、概念、原理和方法。

1.7 建设系统科学的中国学派

学派在科学发展中的重要作用是人所共知的。从科学史看，跟

^① G. J. 克勒：《信息社会中二维的科学出现》，载《哲学研究》，1991（9）。

进式的研究无须也不可能产生学派，开创性的研究需要也能够产生学派。

中华民族是一个富有系统思维的伟大民族。从《易经》、《老子》、《孙子兵法》、《黄帝内经》等传统文化圣典，到现代的毛泽东思想和邓小平理论，都强调用整体的、有机联系的、协调有序的、动态的观点去观察和处理问题。西方著名系统理论家普利高津、哈肯、托姆等，都对中国古代文明中的系统思想赞赏有加。这种优秀文化传统一经与现代系统研究交媾结合，定将产生仅仅沿着西方文明演进轨迹所不可能有的成果，升华出更高水平的系统思想，形成独特的系统科学学派。

现代中国具有极其独特的国情，处于极其独特的历史进程，是一个极具特色的复杂巨系统。正在进行的改革、开放和建设大业，实质是要把补工业文明之课与建设信息文明两大历史任务结合起来，毕其功于一役。完成这一历史任务，需要有独特的运筹谋略，独特的规划设计，独特的组织管理。它需要同时也孕育着独特的系统思想、系统理论、系统方法和技术，造就独特的学派。只有这样的学派能够对中国正在进行的社会实践作出正确的系统学反思，创造体现中国国情的系统理论。

成就卓著的学派必有自己的领袖人物，有独特的工作纲领。系统科学的中国学派众望所归的带头人是钱学森，独特的工作纲领是钱学森的系统科学体系思想。中国系统科学家能够在学科各个领域作出自己的贡献，特别是在系统工程、事理学、系统学、开放复杂巨系统研究和系统科学哲学等领域，可望做出独特的贡献。

钱学森属于系统科学开创时期就参与工作的著名学者。50年代初，在被迫滞留美国的那些日子里，他从维纳哲学味颇浓的著作中提取能够直接应用于工程设计的内容，又从控制工程实践中提取新的控制思想，建立了工程控制论。回国后，他为国家培养

了一批控制专家，组织指导了我国运筹学的研究。在领导我国航天科学技术的实践中，钱学森发展了自己的系统工程思想，创造了总体设计部的方法，为日后的系统科学研究做了准备。

70年代末，钱学森二次“出山”，思维如脱缰之马，纵横驰骋于学术文化的不同领域。其中，他倾注心血最多的是系统科学。这个时期钱学森的主要贡献有以下几方面。（1）总结我国航天系统工程的经验，吸取国外同行的成果和教训，提出一套颇具特色的系统工程理论。（2）从把握现代科学技术总体系入手，阐明系统科学的体系结构。（3）对系统学的对象、特点、建立途径作了深入探讨，提出一系列指导性意见。（4）创立开放的复杂巨系统理论，提出从定性到定量综合集成研讨厅体系的概念。（5）提出沟通系统科学与哲学的桥梁问题，阐明辩证唯物主义是系统科学的哲学基础，多方面探讨了有关系统科学哲学的问题。（6）培养和团结了一批中青年学者，鼓励和指导他们从事系统研究。（7）反复宣传系统研究要坚持马克思主义哲学的指导，坚持从中国国情出发，既要吸收外国学者的成果，又不跟着人家跑，敢于创造有中国特色的理论。这正是创立系统科学中国学派必须坚持的原则。这些工作将使钱学森在系统科学史上占有重要地位。前述哈肯对中国系统科学家的良好评价，首先是对钱学森的评价。

我国从事系统研究的队伍颇为庞大，富有成果。应当特别提到的是廖山涛的微分动力系统研究。他于60年代转向这一新露头角的数学分支时，没有追随西方学者向拓扑方面靠拢，而选择了向微分方程靠拢的独特途径。廖山涛说，他在科研竞赛上的这一战略思想是从“马克思主义的普遍真理与中国革命实践相结合”的毛泽东思想的命题中悟出来的，即理论研究要联系自己生存环境的实际。这种悟性只能产生于现代中国的特殊文化环境。^①国外科

^① 参见廖山涛：《实践需要就是我研究的目的》，载《中国科学报》，1994-02-23。

学界也看到微分动力系统与系统科学有联系，但主要把它作为纯数学分支，他们的基本提法为“微分动力系统是流形上的常微方程”。从系统科学角度看，这种说法大概没有给出多少有用的信息。廖山涛早期已看到这个数学分支在自然科学中显示出极广阔的前景。80年代，在参与钱学森的系统学讨论班活动后，他进一步认识到“微分动力系统要研究的是系统科学中的问题”，得出“微分动力系统是有关系统演化规律的数学学科”的结论^①。廖山涛的工作代表微分动力系统研究的中国学派，为建立系统学提供了重要的数学工具。按照他的意见，有关系统演化规律的研究，微分动力系统还有许多工作有待深入进行。

此外，邓聚龙的灰色系统理论也是中国学者对系统科学的独特贡献，尽管对于建立系统学似乎关系不大，但在实际预测、决策问题中有很好的应用。

我国系统科学的发展状况也有许多不能令人满意之处。钱学森系统科学体系思想的巨大指导作用，至今尚未充分发挥出来。一些系统研究者由于未能认真领会其真谛，至今还在重复已被钱学森澄清了的认识混乱，或提出新的混乱认识。提出建立系统学的任务已有18个年头，人们翘首以待，却不知何时兑现。“至今我们希望确立的有一定中国特色的成套系统理论还没有做到。”^②一些人由此产生了理论上的焦虑和困惑。

然而，中国系统科学的发展方向毕竟已经指明，道路已经打通。只要中国系统科学家能够“踏着时代的步伐，怀着国情的美景”^③，团结奋斗，我们的目标就一定能够达到。

① 廖山涛：《典范方程组和阻碍集》，载许国志主编：《系统研究——祝贺钱学森同志85寿辰论文集》，杭州，浙江教育出版社，1996。

② 《中国系统工程学会成立十五周年纪念特辑》，4页，北京，1995。

③ 许国志：《相期十五载，更上一层楼》，载《中国系统工程学会成立十五周年纪念特辑》，北京，1995。

思 考 题

1. 说明钱学森系统科学体系思想的要点。
2. 为什么说系统科学是世界系统化和信息化的产物？
3. 试阐述系统科学的方法论性质。
4. 系统科学发展的理论突破点在哪里？

阅 读 书 目

1. 钱学森等：《论系统工程》，增订本，73~86、173~188、238~246、263~273 页，长沙，湖南科学技术出版社，1988。
2. 苗东升：《系统科学原理》，第 1 章，北京，中国人民大学出版社，1990。
3. 苗东升：《系统科学辩证法》，导论、第 12 章，济南，山东教育出版社，1998。
4. 朴昌根：《系统学基础》，第 1、2 章，成都，四川教育出版社，1994。
5. 苗东升：《系统科学的困惑》，载《21 世纪 100 个科学难题》，长春，吉林人民出版社，1998。

第 2 章 系统的一般理论

现实存在的系统都是具体的，如物理系统、生物系统、社会系统等。撇开组成成分的基质特性，仅仅把它们看作系统，就是所谓一般系统。一切系统共同具有的、与其组分基质无关的特性，即系统的一般特性。系统的一般理论研究的就是系统的一般特性。

2.1 系统 元素 非系统

在系统科学的庞大体系中，不同学科由于研究范围和重点的不同，常给出不同的系统定义。在技术科学层次上，通常采用钱学森的定义：系统是由相互制约的各部分组成的具有一定功能的整体。这个定义强调的是系统的功能，因为从技术科学看，研究、设计、组建、管理系统都是为了实现特定的功能目标，具有特定功能是系统的本质特性。在基础科学层次上，通常采用贝塔朗菲的定义：系统是相互联系、相互作用的诸元素的综合体。这个定义强调的不是功能，而是元素之间的相互作用以及系统对元素的整（综）合作用。

把贝塔朗菲的表述稍加精确化，得到：

定义 2.1 如果对象集 S 满足以下两个条件

- 1) S 中至少包含两个不同对象：
- 2) S 中的对象按一定方式相互联系在一起。

则称 S 为一个系统，称 S 中的对象为系统的元素。

简言之，两个或两个以上的元素相互作用而形成的统一整体，就是系统。一台机器，一头动物，一家公司，一个国家，一篇文章，一句话，都是一定的系统。

元素是构成系统的最小部分或基本单元，即不可再划分的单元，基本特征是具有基元性。机器作为系统，元素是不能再用机械方法分解的零件。句子作为系统，元素是单词或单字。所谓元素的不可分性，是相对于它所属的系统而言的；离开这种系统，元素本身又成为由更小单元构成的系统。单词或单字可以划分为若干字母或笔划，是一种符号系统。但字母和笔划没有语义，不是构成句子的元素。相对于句子系统，单词或单字是不再可分的基本单元。社会系统以人为元素，人作为生物学系统以细胞为元素。但细胞没有社会性，细胞之间只有生物学的和物理学的作用，不能作为社会系统的元素。研究社会系统，不需要也不可能以细胞为元素来讨论。机器零件由分子组成，但设计和使用机器只须考虑零件之间力学的或电磁的相互作用，无须把机器当作以分子为元素的系统（这里不涉及新近出现的纳米技术）。一个普通的控制装置的体积不比一个激光器小，但由于不需要从分子、原子考虑起，只须把元件作为最小组分，因而被视为小系统。激光器的运行规律须从原子的运动着手描述，再过渡到宏观整体，即必须把原子作为最小组分，因而被当作巨系统。

定义 2.1 表明，系统具有以下基本特征：

(1) 多元性 最小的系统由两个元素组成，称为二元素系统。一般系统均由多个元素组成，称为多元素系统。很多系统包含无穷多元素，称为无限系统。大量系统可以按实体划分元素。但也有许多系统难以这样做，须凭借科学抽象力寻找最小组分，称为要素更适宜。教练员把球队看作由技术、战术、体能、士气、心理素质等要素构成的系统。力学中的质点被视为没有实体组分的

对象，以质量、速度、位置等为要素，叫做质点系统。

(2) 相关性 同一系统的不同元素之间按一定的方式相互联系、相互作用，不存在与其他元素无任何联系的孤立元，不可能把系统划分为若干彼此孤立的部分。所谓“一定方式的联系”，意在要求元素之间的联系有某种确定性，人们能够据以辨认该系统，并与其他系统区分开来。元素之间只有偶然联系的多元集不是系统，人类无法把握他们。具有统计性的偶然联系的多元集是系统，元素之间的联系具有统计确定性，可用概率方法描述。

(3) 整体性 多元性加上相关性，产生了系统的整体性和统一性。凡系统都有整体的形态，整体的结构，整体的边界，整体的特性，整体的行为，整体的功能，以及整体的空间占有和整体的时间展开，等等。所谓系统观点，首先是整体观点，强调考察对象的整体性，从整体上认识和处理问题。但系统与整体不是一个概念，系统必为整体，整体不一定是系统。

定义 2.2 对象集合 N 如果满足以下两个条件之一：

- 1) N 中只有一个不可再分的对象；
- 2) N 中不同对象之间没有按一定方式联成一体，

则称 N 为一个非系统。

这个定义把非系统分为两类。第一类是没有构成元素的事物，即不可分解的囫圇整体，如数学中的单元集。第二类是没有特定联系的对象群体，如数学中没有规定元素关系的多元集，或者至少存在一个孤立元或孤立子集的多元集。但严格意义上的非系统并不存在。单元集只是一种数学抽象，没有一种现实事物是绝对不可分的。夸克被许多人当作不可再分的物质基元，但物理学家新近发现夸克可能仍然可分。即使物理学将来真的发现了物质世界不可再分的最小组分，它也应当像质点那样以某些变量为要素作为系统来分析。现实世界不存在完全没有内部联系的多元集。只有偶然联系的多元集也不是绝对的非系统，因为偶然性联通着随

机性。但在相对的意义上，系统科学承认非系统概念的合理性。有些群体中元素间的联系微弱，忽略这种联系，把它视为第二类非系统，能够更好地显示那些具有紧密内在联系的群体的系统性。第一类非系统也有现实意义。汉字的笔划都是无穷点集，由于这种点并无文字学意义，从文字学观点把笔划看作第一类非系统存在物是合理的。三元笔划集{丿，一，丶}是第二类非系统存在物，只有按汉字规则形成“大”字，才具有文字学意义。总之，非系统与系统相比较而存在，用非系统作反衬，能更好地揭示系统概念的内涵。但现实世界中系统是绝对的、普遍的，非系统是相对的、非普遍的。没有一个现实的事物完全不可被看作系统。一切事物都以系统的方式存在，都可以用系统方法研究。这是系统科学的基本信念。

2.2 整体突现原理

一堆自行车零件对行人没有用处，组装成自行车就具有交通工具的功能。H 原子和 O 原子化合为 H_2O 分子，再聚集起来，就具有水的不可压缩性、溶解性等新性质。无生命的原子和分子组织为细胞，就具有生命这种全新的性质。系统整体与其元素或部分的总和之间的这种差别，是普遍存在且具有重大系统意义的现象。系统论由此得出一个基本结论：若干事物按某种方式相互联系而形成一个系统，就会产生出它的组分和组分的总和所没有的新性质，叫做系统质或整体质。这种性质只能在系统整体中表现出来，一旦把系统分解为它的组成部分，便不复存在。这就是系统的整体突现性原理，又称非加和性原理或非还原性原理。通俗地讲，整体多于部分之和。这是全部系统科学的理论基石。

整体突现性，即整体具有部分或部分总和没有的性质，或高层次具有低层次没有的性质，是系统最重要的特性。所谓用系统

观点看问题，中心之点是考察系统的整体突现性，即不能还原为部分去认识、只能从整体上加以把握的性质。只要是系统，就具有整体突现性，不同系统具有不同的整体突现性。韩愈有诗云：“天街小雨润如酥，草色遥看近却无”。初春田野的片片嫩绿，是一种整体态势。从草地之外一定距离“遥看”，是整体地把握对象，草色可见；走在草地上一片一片地“近看”，是还原成局部去考察对象，草色不可见。这两句诗形象地刻划出系统论与还原论的不同。

系统的整体特性既包括定性方面，即系统质，又包括定量方面，即系统量。系统量是系统在整体上表现出来的量，它们在组分层次上是完全不能理解的，甚至不可能被发现。例如，单个物质分子无温度、压强可言，一旦聚集成热力学系统，便产生了温度、压强等系统量，用它们可以描述热力学系统的整体质，即宏观物理性质。系统的整体质只能用相关的系统量来描述。

如果整体与部分之间存在某种可比较的同质特性，如个人智慧与集体智慧、个人力量与集体力量等，则非加和原理可用公式表示如下

$$W \neq \sum p_i \quad (2.1)$$

其中， W 代表整体， p 代表部分， Σ 为数学求和符号，表示把所有部分 $p_1, p_2, \dots$ 加起来。(2.1) 表示在系统事物中，整体不等于部分之和。这里又分两种情形：

(1) 整体大于部分之和

$$W > \sum p_i \quad (2.2)$$

俗话“三个臭皮匠，赛过一个诸葛亮”，说的就是这种情形；

(2) 整体小于部分之和

$$W < \sum p_i \quad (2.3)$$

俗话“一个和尚挑水吃，两个和尚抬水吃，三个和尚没水吃”，说的就是这种情形。

非系统群体的基本特性是加和性，整体等于部分之和。可用公式表示为

$$W = \sum p_i \quad (2.4)$$

系统是有组织的群体，组织性表现为元素或部分之间存在一定的相互联系。整体突现性是系统的组分之间相互作用、相互激发而产生的整体效应，即结构效应或结构增殖。单个组分或组分的总和不能产生这种效应。苏东坡的诗“若言琴上有琴声，放在匣中何不鸣？若言声在指头上，何不于君指上听？”描写的就是这种效应。

同样一群元素按不同方式相互作用，激发出来的系统效应也不同。取定某个价值标准，将看到系统效应有正、负之分。(2.2)表示正效应，(2.3)表示负效应，(2.4)表示零效应，即无系统效应。可见，把非加和性原理简单地表述为“整体大于部分之和”是不适当的。

系统的整体性必定以某种方式、在某种程度上反映在组分身上，使得处于系统联系中的组分与把它从系统中分离出来时有显著的不同。对于有机体，分离出来的组分与系统中的组分有质的不同。部分或多或少包含着有关整体的信息，但不能一般地说整体的全部信息都反映在它的每一部分中。

组分之间的相互作用也产生相互制约的效应，导致系统整体对组分的约束和限制，使组分自身的某些性质被屏蔽起来。整体对组分的屏蔽作用是产生整体突现性的必要代价。有所屏蔽，才能有所突现。一旦系统整体被打破，那些被屏蔽起来的因素就会冒出来，在形成新的整体中发挥作用。水分子的形成屏蔽了氢的可燃性和氧的助燃性，其聚集体产生了不可压缩性等水的特性。冷战结构的形成屏蔽了许多民族矛盾和宗教冲突，冷战结构解体后，这些矛盾冲突又暴露出来，显著地影响世界新秩序的建立。

2.3 系统的结构

元素或组分之间的相互联系，撇开与组分基质有关的特性（如机械的、生物的或社会的），其方式仍然是多种多样的。有空间的联系和时间的联系，持续的联系和瞬间的联系，确定性联系和不确定性联系，等等。广义地讲，元素之间一切联系方式的总和，叫做系统的结构。但不同联系方式对系统的形成、运行、存续的影响不同，有时相去甚远。把所有的联系都考虑进去，既无必要，也无可能。可行的办法是略去无关紧要的、偶发的、无任何规则可循的联系，把结构看作元素之间相对稳定的、有一定规则的联系方式的总和。

没有按一定结构框架组织起来的多元集是一种非系统。结构不能离开元素而单独存在，只有通过元素间相互作用才能体现其客观实在性^①。结构主义把结构看做独立于元素而单独存在的东西，是错误的。元素和结构是构成系统的两个缺一不可的方面，系统是元素与结构的统一。给定元素和结构两方面，才算给定一个系统。

即使只从系统意义看，结构也是千差万别的，很难给以近似完备的分类，只能具体情况具体分析。为便于读者理解，这里简述几种结构。

空间结构和时间结构 元素在空间中的排列分布方式（代表元素间一定的相互作用方式），称为空间结构。如晶体的点阵结构，建筑物的立体结构。系统运行过程中呈现出来的内在时间节律，如

^① 由于这种依赖性，许多人讲的结构也包括元素或组分，实际上是把结构定义为组分的总和加上联系方式的总和，这就是系统。把结构与系统当作一回事，这样处理在逻辑上不适当，为系统理论所不取。

地月系统的周期运动、生物钟等，称为时间结构。还有一些系统呈现出时空混合结构，如树的年轮。

对称结构与非对称结构 中国古建筑具有明显的对称结构，西洋建筑的非对称结构比较明显。人体既有对称结构，如人的五官对称，四肢对称；也有非对称结构，如肝、脾成单，心脏偏左，肺脏偏右。

深层结构与表层结构 乔姆斯基揭示出语言系统有深层结构与表层结构的区别与联系，对于认识一般系统的结构也有意义。如社会巨系统，根本制度是深层结构，具体运作体制是表层结构。一般来说，深层结构决定表层结构，表层结构反映并反作用于深层结构。深层结构比较稳定，表层结构容易改变。

硬结构与软结构 计算机系统的硬件即硬结构，软件即软结构。一般系统也有这两种结构之分。一般来说，空间排列、框架建构属于硬结构；细节关联，特别是信息关联，属于软结构。球队成员的职责分工是硬结构，比赛中灵活的配合、默契、对教练的信赖等是软结构。人们往往重视硬结构，忽视软结构。但硬结构问题比较容易解决，软结构问题往往不易捉摸，难以解决。同类企业，人员配置、分工关系大体相同，工作成绩可能显著不同，原因在于软结构不同。在管理工作中，硬结构的设计、调整、重建是间或才有的事，处理软结构问题是经常性的，因而应予更多的注意。管理水平的高低往往表现在这里。

在元素众多、结构复杂的系统中，元素之间有一种成团现象，一部分元素按某种方式更紧密地联系在一起，具有相对独立性，有自己的整体特性。不同集团的元素之间往往不是直接相互联系，而是通过所属集团而联系在一起。这类集团被称为子系统或分系统。

定义 2.3 S_i 被称为 S 的一个子系统，如果它同时满足条件

- 1) S_i 是 S 的一部分，即 $S_i \subset S$ ；
- 2) S_i 本身是一个系统。

定义中的义项 1 表示子系统具有局域性、从属性，只是系统的一部分。义项 2 表示子系统具有系统性，既不是任意部分，也不是元素，没有基元性。有些著作不区分元素和子系统，常把元素也称为子系统。如把热力学系统中的分子称为子系统，但并不关注分子的系统性。这样处理逻辑上不严密，容易引起混乱。当我们考察系统的某一部分时，若只须把它当作最小结构单元，无须作为系统对待，就应称其为元素。如果我们关心的是该部分作为整体的结构和特性，则应称其为子系统。

设系统 S 被划分为 n 个子系统 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。正确的划分应满足以下要求：

1) 完备性
$$S = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_n \quad (2.5)$$

2) 独立性
$$S_i \cap S_j = \emptyset \text{ (空集)}, i \neq j \quad (2.6)$$

划分子系统，确定子系统之间的关联方式，是刻画系统结构的重要方法。复杂系统可以而且需要从不同角度或按不同标准划分子系统。完备性和独立性要求是针对按同一标准划分出来的子系统讲的，按不同标准划分出来的子系统一般并不相互独立，往往含有部分相同的元素。按同一标准划分出来的子系统有可比性，彼此至少在逻辑上是并列的。但对于了解系统结构，真正重要的是了解子系统之间那些非对称的、非平等的关系。社会系统由经济、政治、文化三个子系统组成。一种观点认为，三个子系统之间是平等的兄弟关系，讲“经济基础决定上层建筑”不符合系统原理。这是对系统理论的误解。还应注意，按不同标准划分出来的子系统之间无可比性，不可混为一谈。

系统是否需要划分子系统，主要不在于元素多少，而在于元素种类的多少（元素差异的大小）和联系方式的复杂性。封闭容器中的气体系统的元素（分子）数量极大，但种类少，相互作用方式单调，一般不会形成不同性质的子系统。一个规模不大的企业，由于职工分工不同，政治的、经济的、人事的关系复杂，总

体划分为许多子系统，结构比气体系统复杂得多。

如果元素之间的联系方式能用数学中的关系概念来表示，则系统的结构可用集合论描述。设 $A = \{x | x \text{ 具有性质 } p\}$ 为一多元集， $R = \{r_1, r_2, \dots\}$ 为 A 中的关系集，满足定义 2.1 的要求，则 A 与 R 一起确定了一个系统 S

$$S = \langle A, R \rangle \quad (2.7)$$

数学中的图、树、群、格等都可以刻划某些系统的结构，在系统科学中有很多应用。

集合 R 中的关系 r 按其对系统的作用分为两类。那些对于把 A 中全部元素联系起来形成系统并产生整体新质必不可少的关系，称为系统的构成关系。 R 中的其他关系为非构成关系。家庭作为系统，夫妻、双亲与子女、兄妹等关系为构成关系。有些夫妻还有同学或师生之类的关系，对于家庭系统是非构成关系。了解系统结构主要是把握构成关系。但要全面认识系统，有时还需了解非构成关系。组织理论讲的非组织，就是企业系统中由非构成关系形成的子系统，搞好管理需要研究这类非组织。

系统的构成关系应具有完备性，通过这种关系把系统中的所有元素联系在一起。系统中不存在相对于构成关系的孤立元素，即不允许同一系统的两个元素之间只有非构成关系。这叫做系统构成关系完备性原理。

2.4 等级层次原理

知道系统包含那些子系统及其关联方式，还不能全面了解复杂系统的结构。不同子系统（按同一标准划分出来的）可按各自的系统质区分开来，但它们是同一等级的系统质，从一个子系统向另一子系统过渡不存在质的提升。但复杂系统中常可看到较低级的系统质与较高级的系统质的差别，对系统结构有重要影响。刻

划这类系统现象需要层次概念。子系统和层次是刻画结构的两个主要工具。在多层次系统中，子系统是按层次划分的。人们的许多认识错误起源于混淆不同层次的子系统。

有些文献用部分来定义层次，常见“层次是系统中具有某某性质的部分”之类说法，实为不妥。严格意义上的层次不是系统的某一部分，层次划分与部分划分不是一回事。不同部分是相互独立的，除去某一部分，其他部分还存在。不同层次一般不是不同部分，除去某个层次，其他层次也无法存在。自然科学中公认的层次划分，如宇宙中有基本粒子层次、原子层次、分子层次等，它们不是宇宙的不同部分，除去原子层次的物质，也就不存在所谓分子，因为分子是由原子构成的；除掉原子，也谈不上基本粒子层次，因为宇宙中未被组织到原子中的基本粒子是很少的。

整体突现性原理提供了正确把握层次概念的理论依据。系统的整体质是由元素相互作用而产生的质的飞跃。但在复杂巨系统中，从元素质到系统质的根本飞跃不是一次完成的（简单系统可以看作是由元素层次加上结构因素而直接飞跃到整体层次），而是经过一系列部分质变实现的，每发生一次部分质变，就形成一个中间层次；或者说，每出现一个新的层次，就有一次新质的提升；一直到完成根本质变，形成系统的整体层次。因此，层次是从元素质到系统整体质的根本质变过程中呈现出来的部分质变序列中的各个阶梯，是一定的部分质变所对应的组织形态。

不同层次之间有高低、上下、深浅、内外、里表的区别。高层次包含低层次，低层次隶属于高层次；或者高层次支配低层次，低层次服从、支撑高层次。宇宙物质系统的不同层次，生命系统的不同层次，都是这样的。了解不同层次之间这种不对称关系，对于把握系统结构是重要的。

在非典型的情况下，系统的不同层次也可能同时是它的不同部分。对于这种系统，按某个标准划分出来的不同子系统，同时

又有高低、上下、深浅、里外之分，因而也被当作不同的层次。如地球分为地核、地幔、地壳三个层次，彼此在空间上有包含与被包含的关系，同时也是三个子系统。许多系统呈现这种壳层结构。还有些系统具有塔层结构，或圈层结构，等等。

自然界演化出来的系统，人类社会作为系统，许多人造系统，以及语言符号系统、思维系统等，都具有等级层次结构。系统论断言，无论是系统的形成和保持，还是系统的运行和演化，等级层次结构都是复杂系统最合理的或最优的组织方式：或最少的空间占有，或最有效的资源利用，或最大的可靠性，或最好的发展模式，等等。这就是等级层次原理。

贝塔朗菲认为：“等级层次的一般理论显然是一般系统论的一个重要支柱”^①。实际上，它也是全部系统科学的重要支柱，在各个学科分支都有应用。等级层次理论的主要课题是：什么是层次，如何划分层次，层次的基本特性，层次形成的机理，不同层次如何联系和过渡，如何从低层次的质提升到高层次的质，等等。对于这些问题，系统科学尚未形成一般理论，缺乏适当的数学工具。

2.5 系统的环境

每个具体的系统都是从普遍联系的客观事物之网中相对地划分出来的，与外部事物有千丝万缕的联系，有元素或子系统与外部的直接联系，更有系统作为整体与外部的联系。这种联系对于形成系统特有的规定性是必要而且重要的。这是系统的外部规定性。外部的变化或多或少会影响到系统，改变系统与外部事物的联系方式，往往还会改变系统内部组分的联系方式，甚至会改变

^① 贝塔朗菲：《一般系统论》，25页（译文有所改动），北京，清华大学出版社，1987。

组分本身，包括增加或除掉某些组分。市场变化导致企业调整结构，改变经营方式，以至人员变动，更换经理。白色恐怖导致一些人退出革命组织，或革命政党改变组织结构和活动方式。

广义地讲，一个系统之外的一切事物或系统的总和，称为该系统的环境。令 U 记宇宙全系统， S 记我们考察的系统， S' 记它的广义环境，则

$$S' = U - S \quad (2.8)$$

实际上，不可能也无必要列举 S 与 S' 中一切事物的联系。狭义地讲， S 的环境，记作 E ，是指 U 中一切与 S 有不可忽略的联系的事物之总和，即

$$E_s = \{x | x \in U \text{ 且与 } S \text{ 有不可忽略的联系}\} \quad (2.9)$$

一句话作为系统，上下文是它的环境，称为语境。一架正在飞行的航空器，周围的空气、山水、其他飞行器等是它的环境。社会系统的环境包括两方面，即自然环境和社会环境（人类社会作为整体只有自然环境）。环境具有客观普遍性，一切系统都在一定的环境中形成、运行、演变。只要 $S \neq U$ ，它的环境就不是空集

$$E \neq \emptyset \quad (2.10)$$

但环境的划分有相对性。确定系统环境的根据是它的构成关系，环境系统是构成关系不再起作用的对象范围。

环境意识或环境观念是系统思想的重要内容，环境分析是系统分析不可或缺的一环。系统的完整规定性由内部规定性和外部规定性共同构成。句子的语义与其语境有关，同一句话因不同的上下文而含义不同。飞机的速度、姿态、飞行路线因环境不同而不同。一个国家的内外政策和国家行为，与自然环境有关，更与社会环境有关。新中国成立之初，帝国主义的封锁和威胁，迫使她很少参加国际活动。当代中国的国际环境则允许打开国门，广泛参与国际事务。总之，把握一个系统，必须了解它处于什么环境，环境对它有何影响，它如何回应这种影响。

环境具有系统性，常被称为环境超系统。环境分析必须运用系统观点，了解环境的组分，组分之间的关系，环境超系统的整体特性和行为。一般来说，环境中的事物的相互联系要弱于系统内部的联系。环境具有某种程度上的非系统性，为系统趋利避害、保护和发展自己提供了可能性。

环境既有定常性，又有变动性。有些系统的环境在很长时期内基本不变，但完全不变的环境不存在。有些系统的环境处于显著变化中，但仍有相对不变的一面。环境的定常性与变动性、确定性与不确定性，对系统的存续运行都既是有利因素，又是不利因素。

把系统与环境分开来的某种界限，叫做系统的边界。从空间结构看，边界是把系统与环境分开来的所有点的集合。从逻辑上看，边界是系统构成关系从起作用到不起作用的界限，系统质从存在到消失的界限。边界肯定了系统质在其内部的存在，同时就否定了系统质在其外部的存在。边界的存在是客观的，凡系统均有边界。但有些系统的边界并无明确的形态，难以辨认。有些系统的边界有模糊性，系统质从有到无是逐渐过渡的。复杂系统的边界还可能有分形特性^①，一系统与其他系统在边界地段相互渗透，你中有我，我中有你，无法通过有限的步骤完全区分开来。

系统与环境相互作用、相互联系是通过交换物质、能量、信息实现的。系统能够与环境进行交换的特性，叫做开放性。系统自身抵制与环境交换的特性，称为封闭性。系统性是封闭性与开放性的对立统一。一般来说，一个系统（特别是生命、社会、思维系统）只有对环境开放，与环境相互作用，才能生存和发展。开

^① 分形是一种极不规则的、具有大小不一的各种不同尺度结构的复杂图形，理论上应具有无穷多层次，不同层次之间有某种自相似性。现实的分形大量存在，如山脉形态、河流分布、金属断裂面等。

放得愈充分有效，自身的运行发展也愈有效。开放不够，系统的生存发展将受影响，严重时导致解体。但封闭性绝非单纯消极因素，而是系统生存发展的必要保障条件。从环境中输入的东西不免泥沙共下，苛求输入纯而又纯无异于不要开放。但并非任何开放都对系统有利，人吃山珍海味太多会坏胃口，误食有毒物会生病。国家要从外部世界获取必要的物资、知识、技术、文化，同时就可能有消极腐朽的东西混进来。这就要求发挥封闭性的积极作用。在开放条件下，系统必须对输入输出加以管理，认真检验、鉴别、过滤。全盘否定封闭性，提倡“彻底开放”，拒绝对外来的东西加以过滤，这种观点在理论上违背系统原理，实践上极其有害。简言之，系统性是开放性与封闭性的统一。

按照系统与环境的关系，可划分出开放系统与封闭系统。同环境无任何交换的是封闭系统。现实系统或多或少都有开放性，但开放程度差异极大。有些系统与外部的交换极其微弱，允许忽略不计，看做封闭系统。封闭系统是系统开放性弱到极限时的一种理想情形。由于封闭系统便于研究，常被经典科学用来作为某类对象的理论模型。

2.6 系统的行为和功能

行为原是心理学和行为科学的概念，被定义为人类日常生活所表现的一切动作。维纳等人把行为概念推广应用于人以外的一切系统，如动物、机器、社会组织等。现代系统理论作了进一步推广，在各种意义上讨论系统行为，如适应行为、学习行为、平衡行为、演化行为、临界行为、自组织行为等。在一定意义上讲，系统科学是关于系统行为的科学。

按照维纳等人的意见，可以把系统行为定义为系统相对于它的环境做出的任何变化。或者说，一个系统可以从外部探知的一

切变化，均称为它的行为（子系统的行为包括它相对于母系统做出的变化）。行为是刻划系统与环境相互关系的概念。行为属于系统自身的变化，是系统特性的表现，不是它所引起的环境变化。但行为是系统相对于环境的变化，故可从外部加以探测。

系统在内部联系和外部联系中表现出来的特性和能力，称为系统的性能。系统行为所引起的环境中某些事物的有益变化，称为系统的功能。被改变了的外部事物，叫做系统的功能对象。性能一般不是功能，功能是特殊的性能。可以流动是水的重要性能，利用它输送木材是河水的功能。燃烧效率是发动机的重要性能而不是功能，提供推力才是它的功能。性能是功能的基础，提供了发挥功能的可能性。功能只能在系统行为过程中呈现出来，通过它所引起的功能对象的变化来衡量。功能概念也常用来刻划元素或子系统对整个系统的作用，即对系统整体存续运行的贡献。

凡系统都有自己的功能，这是功能的普遍性。有一种观点认为有些系统没有功能，如封闭系统。此说不妥。既然封闭系统只是一种抽象，真实系统都对环境有作用，它就有某种功能。即使完全封闭的系统，它从无到有的形成过程，把它从环境中封闭起来的边界，都会改变环境。一切现实存在的系统都是环境的组成部分，影响着环境的形成和保持，这就是某种功能。没有它的存在，环境必定是另外的样子。

一般系统都有多种功能。系统性能有多样性，每种性能都可能被用来发挥相应的功能，或综合几种性能发挥某种功能。环境中的功能对象往往不只一种，同一系统对不同对象有不同功能。书的首要功能是传播知识和精神食粮，也有装饰居所的功能，对作者有获得名利和交友的功能，甚至被用于其他无文化含义的方面。功能分本征的与非本征的两类。车辆的本征功能是运输，有时被当作储存室或路障，就是非本征功能。

一种流行观点认为，结构与功能有对应关系，结构决定功能。

这是一种简化提法，容易引起误解。从系统本身看，功能由元素和结构共同决定。元素性能太差，不论结构如何优化，也造不出高效可靠的机器。任意挑选六个球员，再高明的教练也无法训练出一支世界级排球队。必须有具备必要素质或性能的元素，才能构成具有一定功能的系统。这是元素对功能的决定作用。但同样或相近的元素，按不同结构组织起来，系统的功能有优劣高低之分，甚至会产生性质不同的功能。这是结构对功能的决定作用。

系统的功能还与环境有关。首先，同一系统对不同功能对象可能提供不同的功能服务。对象选择不当，系统无法发挥应有的功能，即所谓“用材不当”。“大炮打苍蝇”之受到嘲笑，在于用错了功能对象。所谓某人“在甲单位是一条虫，在乙单位是一条龙”，讲的也是环境包括功能对象适当与否对发挥人才作用的巨大影响。环境的不同还意味着系统运行的条件、气氛等的不同，可能对系统发挥功能产生有利或不利的影晌。

总之，元素、结构、环境三者共同决定系统的功能。设计或组建具有特定功能的系统，须选择具有必要性能的元素，选择最佳的结构方案，还要选择或创造适当的环境条件。使用一个既存系统，须正确选择功能对象，“好钢用在刀刃上”；要尽力提高元素性能，改善结构。从工程实际活动看，往往是元件条件已定，在一定时期无法获得更高性能的元件，或无法提高成员的素质，环境条件也已规定，人们可以努力的主要是在优化结构上下功夫。在元素和环境给定的情况下，才是结构决定功能。

功能发挥过程对结构有反作用，促使结构改变。机器在使用中发现改进结构的途径，新的功能需求启示人们发明新的结构方案。生物器官用进废退，环境变化引起原有功能不适应，是生物机体结构变化的决定性原因。这是功能对结构的积极的反作用。如果功能发挥不适当，可能使系统结构受到损伤，是功能对结构的消极的反作用。

2.7 系统环境互塑共生原理

现在可以全面地讨论系统与环境的关系了。环境对系统有两种相反的作用或输入，给系统提供生存发展所需要的空间、资源、激励或其他条件，是积极的作用、有利的输入，统称为资源。给系统施加约束、扰动、压力甚至危害系统的生存发展，是消极的作用、不利的输入，统称为压力。这两种作用都会在系统的形态、特性、行为等方面打上环境的烙印。不同环境造就不同的系统。所谓“一方水土养一方人”、“近朱者赤，近墨者黑”等成语，说的就是这种情形。这是环境对系统的塑造。

系统对环境也有两种相反的作用或输出。给环境提供功能服务，是积极的作用、有利的输出，统称为功能。系统自身的行为，与其他系统为争夺资源而展开的竞争，有破坏环境的作用，即不利的输出，称为对环境的污染。这是系统对环境的塑造作用。图2.1描绘了系统与环境全面的相互关系。

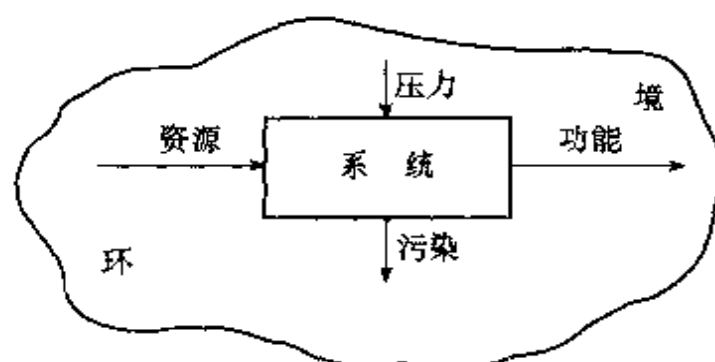


图 2.1

关于环境对系统的塑造作用，现有系统理论作了充分的讨论。关于系统对环境的塑造作用，现有系统理论几乎未曾涉及。但一系列全球性危机的出现表明，这种局面必须改变，论述系统对环境的塑造作用应成为系统理论新的基本课题之一。这种讨论主要是针对所谓活系统进行的。活系统的基本行为之一，是不断向环

境排泄自身的废物。如果这种排泄物能够纳入环境超系统的大循环之中，成为其他系统的资源，从而被环境吸收消化，则是一种有益于环境的行为。如果排泄物不能被环境吸收消化，积累到一定程度，就成为对环境的污染，导致环境品质变坏，威胁到系统自己的生存发展。

消耗环境资源也是活系统的一种基本行为。环境资源的基本特征是有限性、多样性、可变质性。不合理的资源消耗将导致环境资源匮乏，减少环境组分的多样性，最终危及系统的生存发展。环境资源可能因污染而变质，不再适于系统需要，甚至危及其生存发展。目前人类社会已经面临这种危险。人类赖以生存的一切资源，如空气、水、阳光、动植物以至精神食粮，都可能并且事实上处于被污染的危险中。这些都是系统行为对环境的负面塑造作用。

环境向系统提供资源的能力，称为源能力。环境吸纳、同化系统排泄物的能力，称为汇能力。源能力与汇能力共同构成环境对系统的支撑能力。系统的行为不当，会导致对这些能力的破坏；行为合理，能起到保护甚至发展环境支撑能力的作用。

把生态概念推广到系统理论，可以一般地讨论系统的环境生态问题。在同一环境中产生发展起来的不同系统，总体上是互补共生的。或者因相互直接提供功能服务而共生，或者同处于环境大循环过程、通过中介环节而共生。相互竞争的系统因相互提供竞争对手而互补共生。即使捕食与被捕食的关系，不同系统也通过相互制约而共生，如果被捕食者系统消亡，捕食者系统也随之消亡。多种多样的环境组分，通过多种多样的相互作用，形成环境超系统的复杂生态网络，达成组分系统“一荣俱荣，一损俱损”的生态平衡。每个组分系统的变化都影响环境超系统，环境生态平衡的破坏将危及每个组分系统的生存。

总之，环境塑造着环境中的每个系统，环境又是组成它的所

有系统共同塑造的。为了生存发展，系统必须有效地开发利用环境、适应环境、改造环境，同时要限制对环境的开发、利用、改造，把保护和优化环境作为系统自身的重要功能目标，以此规范自己的行为，维护环境生态平衡。人类社会作为系统尤其如此。当工业文明高度发展、人类社会的排泄物远远超过自然环境的自化能力时，这个系统必须改变自己的行为方式，创造新的技术手段把这些排泄物纳入人工大循环中，把人类社会的自化与自然界的自化结合起来，把社会发展与环境保护协调起来。这个重大课题真正解决之时，将是新的人类文明——信息-生态文明形成之时。

2.8 系统的秩序

秩序性问题，包括有序和无序，是刻画系统形态特征的重要方面。制造和组建系统，管理和使用系统，甚至观赏系统，关注的中心都是系统的有序性。就人类的价值判断看，一般认为有序胜于无序，高序优于低序。但这些概念远比人们的直观理解要复杂得多，科学至今无法给有序与无序以精确而普适的定义。一些系统理论从物理学引入对称破缺概念，把有序定义为破缺了的对称性，能否推广到一般系统，尚待研究。我们采用不太严格的通俗说法，把有序理解为事物之间规则的相互联系，把无序理解为不规则的相互联系。没有相互联系的事物群体即非系统，不存在秩序性问题。

系统的有序性首先指结构的有序性。组分（元素、子系统）之间的联系方式可能是规则的、确定的，也可能是不规则、不确定的。简单有序，指的是组分在空间分布上的规则排列，如晶体点阵；或为时间延续中的规则变化，如周期运动。简单无序，指的是组分在空间分布上的无规则堆积，如垃圾堆；或为时间延续中的任意变化，如随机运动。不论简单有序或简单无序，都可以用

对称破缺概念作数学刻划。

系统的有序性还表现于行为的有序和功能的有序。系统的行为与功能是作为过程而展开的，包括多个阶段、步骤、程序等，需要有序地协调安排，以求行为和功能的优化。行为和功能直接表现的是系统与环境的相互联系，联系方式有规则的与不规则的、较强的规则性与较弱的规则性的区别，但更多地取决于系统内部联系即结构的有序或无序、高序或低序。

纯粹的有序或无序只是理论抽象，真实系统的有序和无序是相对的，它们相比较而存在，相排斥而演变。晶体的有序排列中总有缺陷，地月系统的周期运动存在非周期摄动，成熟的法治社会也免不了违法现象。另一方面，所谓杂乱无章的堆积物也有某种规则联系，随机运动存在统计确定性，也是一种有序结构。至于复杂系统，有序与无序总是相伴而生，彼此都有明显的表现，表观的无序掩盖着丰富多彩的精细结构，因而是一种复杂的高级有序。空间排列上的分形结构，时间演化中的混沌行为，都是这类复杂的有序，或嵌在无序中的有序。

系统的有序性是在其形成过程中通过对组分的整合建立起来的。内部组分的多样性和差异性，环境组分的多样性和差异性，既是滋生混乱无序的土壤，也是建立秩序的客观前提。诸多事物能够被整合成为一个系统整体，必有互补互利、合作共生的需要和可能，这是产生有序的基础。既为差异物，必定在资源占有上有相互妨碍、竞争排斥的一面，这是产生无序的基础。但合作互补可能导致相互依赖，诱发惰性，产生无序性；竞争互碍可能激发主动性进取性，产生有序性。整合方式合理，合作与竞争、互补与互碍都是形成有序的积极因素；整合方式不合理，它们都是导致无序的消极因素。整合包括被整合者的相互协调，但不限于协调，整合还包括限制、约束甚至压制，舍此不能形成有序结构。只讲差异协调是片面的，差异整合才是系统论的基本原理。

整合作用不只存在于系统的形成组建阶段，也贯穿于系统生存发展的全过程。活系统尤其如此。形成阶段解决的是从无序到有序的问题，然后才能解决从低序到高序、从不完善到比较完善的发展问题。不同组分之间、系统与环境之间的互碍互斥和矛盾冲突不断产生出破坏系统有序性的力量和趋势，必须在系统生存发展过程中不断解决，或者维护现存的有序性，或者创造新的整合方式以改进系统的有序性。

2.9 系统的演化

整体观点，结构观点，环境观点，功能观点，都是系统观点的组成部分。但若无演化观点，仍然不是完整的系统观点；离开演化观点去看整体、结构、环境和功能，还不能彻底克服机械论。

系统的发生 一切实际存在的系统，比如说 A ，都是从无到有的。世界上本来不存在 A ，在由其他事物或系统组成的环境中，无所谓 A 的内部与外部。当某种条件具备后，经过一定过程，划分出 A 的内部与外部，系统 A 便从无到有。系统的从无到有、从内外不分到内外有别，就是系统的发生。系统作为差异性与多样性的统一，首先要存在有差异的多种事物，彼此吸引、排斥、交往、互动，才可能出现整合过程。整合包含差异物之间的协调和合作，否则无法统一于一个整体中。但整合不限于协调，还包括约束和强制。环境压力就是一种强制力。在既定环境压力下，差异物只有整合为一个系统，产生整体突现性，才能在环境中生存发展。差异物之间必有排斥、竞争、磨擦，需有整体的调控和必要的约束、限制甚至强制，才能成为系统。系统是差异整合的结果，系统发生过程即差异整合的过程。整合过程的主要任务是解决组织结构问题，但同时也在改变和塑造着系统的组分。一般情况下，整合过程开始时的被整合对象与系统形成后的组分不是一回事，有时

甚至面目全非。系统发生过程也影响和塑造着它的环境，系统形成后的环境与形成前的环境是不同的。系统发生方式多种多样，如：（1）非系统的多元集经过元素会聚和整合成为系统；（2）从既存多个系统中选择元素按一定结构组成新系统；（3）从原有系统中分裂出较小的新系统；（4）若干系统联合成为一个新系统；（5）某个系统经过结构（整合方式）质变转化为另一新系统，等等。

系统的维生 真实系统或多或少都表现出能使自己生存延续的能力，即使内外条件发生许多变化，系统仍能保持其基本结构、特性和行为不变，使人能辨认是“它自己”。自我保持是系统的基本特性之一。系统的维生能力取决于三个因素。元素的存续是系统存续的实在基础，元素存续力强，系统存续力也强。系统存续力还与结构有关。结构良好，不同元素、不同子系统之间相互支持，“合作共事”，能使系统整体长期保持正常运转。结构不合理，组分之间相互制肘、冲突，必然导致系统整体运行混乱，故障不断。由于结构的作用，元素可靠性差并不意味着系统必不可靠。早期系统研究已经发现，重复使用大量不那么可靠的元件，可以建造出高度可靠的系统。结构往往是决定系统存续能力强弱的关键因素。系统存续也与环境有关。选择或营造合适的环境，善于适应变化了的环境，能在环境中趋利避害，是系统存续能力的基本表现。

系统的演化 不论何种系统，存续能力都是有限的，不可能永远保持其基本结构、特性、行为不变。演化性是系统的另一基本属性。系统科学的很大一部分内容是研究系统演化的（本书第3至9章都属于系统演化理论）。这里只作最一般的讨论。（1）系统演化的动因。系统演化的终极动因在于相互作用。首先是系统内部元素之间、子系统之间、层次之间的相互作用，包括吸引与排斥、合作与竞争等。这是系统演化的内部动因，关键是非线性

的相互作用。系统与环境之间的相互作用是演化的外部动因。系统与环境的适应是相对的。系统自身时时在变化，环境在不断变化，导致系统与环境不可能完全适应，有时甚至是强烈的不适应。由此产生环境对系统的压力，并转化为内部的相互作用，推动系统改变组分特性和结构关系，获得新的整体特性和行为，达成与环境新的适应。(2) 演化的方向。从演化的始点到终点的向量代表系统演化的方向。总体上讲，系统既有上向的前进的演化，也有下向的后退的演化。系统论视前者为演化的主导方向。一般认为，系统从无序无组织到有序有组织、从低序低组织水平到高序高组织水平，是上向的演化，否则为下向的演化。(3) 系统演化的机制。揭示系统演化的机制、机理和规律，是系统演化理论的核心内容。各种系统理论对此都有所贡献，但至今尚未形成完整的理论体系。本节只提及一点，即层次化原理。系统是沿着由单层次到多层次、由较少层次到较多层次的方向演化的。复杂性的增加既表现在同一层次上由简单到复杂的演化，也表现在增加层次上，全新的复杂性要求突现出全新的层次。系统演化是复杂化与简约化的统一，高层次的组织往往比低层次的组织要简单。最初形成的系统可能有多余的结构，要在演化中简化掉。但总的来说，系统是朝增加复杂性方向演化的，层次的增多总意味着复杂性的增加。

系统的消亡 曹操诗云：“神龟虽寿，犹有竟时。”它道出了一条系统论原理：一切系统的寿命都是有限的。系统消亡有两种基本方式和动因。破坏性的环境压力直接导致系统消亡：或者是边界被打破而不能修复，或者是要害子系统被破坏，或者是整个系统被摧毁。但基本的方式是系统逐步老化，包括组分老化和结构老化，整合力衰减，达到临界值时系统消亡。这是内因导致的消亡。有时内外因素综合作用，导致系统发生病变、分裂而消亡。不论哪种情形，系统消亡都是整合能力被破坏的结果。

系统与过程 系统的发生、维生、演化、消亡都是作为过程而展开的。就是结构也不是纯粹非过程性的东西。一切结构都是某种潜在或显在过程的表现。现代物理学证明，不存在固定不变的基础结构。机器组分之间相互作用和制约的方式，要在机器运行过程中才能充分显示出来。一切结构只能显现于系统的运行过程中。生命系统、社会系统和思维系统的结构只能存在于相应的过程之中。过程的观点也是系统观点的重要内容。

思 考 题

1. 为什么说系统是一切事物的存在方式之一？如何理解非系统概念？
2. 结合实例阐述整体突现原理和差异整合原理。
3. 试阐述可持续发展战略的系统科学依据。
4. 贝塔朗菲把马克思看作他的学说的“光辉思想先驱”之一，并要求读者思考他的一般系统论与辩证唯物论的关系，为什么？
5. 系统科学如何批判机械论？早期系统理论在哪些方面仍受到机械论的束缚？

阅 读 书 目

1. 苗东升：《系统科学原理》，第11章。
2. 苗东升：《系统科学辩证法》，第1、13、14、15、16章。
3. E. 拉兹洛：《用系统论的观点看世界》，北京，中国社会科学出版社，1985。
4. 魏宏森、曾国屏：《系统论——系统科学哲学》，北京，清华大学出版社，1996。

第 3 章 动态系统理论

系统特性包括定性定量两方面。上一章给出的是刻划定性特性的概念框架，未涉及定量特性。直接从描述结构等定性特性入手，很难引入数学方法，建立深入的系统理论。定量特性是定性特性的显化，一般均有较强的可观测性、可操作性，能用数学方法处理。选择适当的系统量，通过对这些量的特征、关系和变化规律的数学刻划，既可获得系统定量特性的精确知识，又可深入认识系统的定性特性。从本章起，我们主要讨论定量化系统理论。

3.1 状态 状态变量 控制参量

系统存续运行中表现出来的状况或态势，如国家的经济状况、运动员的竞技状况、两军相争中的战场态势等，称为系统的状态。系统的行为是通过状态的取得、保持和改变来体现的。研究系统，主要关心的是它所处的状态、状态的可能变化、不同状态之间的转移等。系统状态用一组称为状态量的参量来表征。质点系统的力学运动状态用质点的质量、位置、动量等参量来表征。社会经济系统的运行状况用国民经济总产值、国民平均收入、价格比等参量来表征。给定这些参量的一组数值，就是给定该系统的一个状态，这些量的不同取值代表不同的状态。

由于状态量可以取不同的数值，允许在一定范围内变化，故

称为状态变量。最简单的系统只有一个状态变量，可记作 x 。一般系统须用多个状态变量刻划，称为多变量系统。设系统有 n 个状态变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。为简化记，引入状态向量概念，定义为

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

即以状态变量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为分量的向量。 X 是 n 维向量。

同一系统的状态变量可以有不同的选择，但也不是任意的，应当满足以下要求：

- (1) 客观性：具有现实意义，能反映系统的真实属性；
- (2) 完备性： n 足够大，能全面刻划系统的特性；
- (3) 独立性：任一状态量都不是其他状态量的函数。

简言之，状态变量是决定系统行为特性的一组完备而最少的系统量。

系统所有可能状态的集合，称为系统的状态空间。以状态变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为坐标张成的空间，就是状态空间。空间的每个点，即每一组数 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，代表系统的一个可能状态。独立状态变量的个数 n 代表状态空间的维数。1 维状态空间的几何表示为一条直线，如图 3.1 (a) 所示。2 维状态空间的几何表示是一张平面，常称为状态平面，如图 3.1 (b) 所示。3 维状态空间如图 3.1 (c) 所示。 $n \geq 4$ 为高维空间，无法作直观描述。状态空间是抽象空间，不可与真实物理空间混淆。

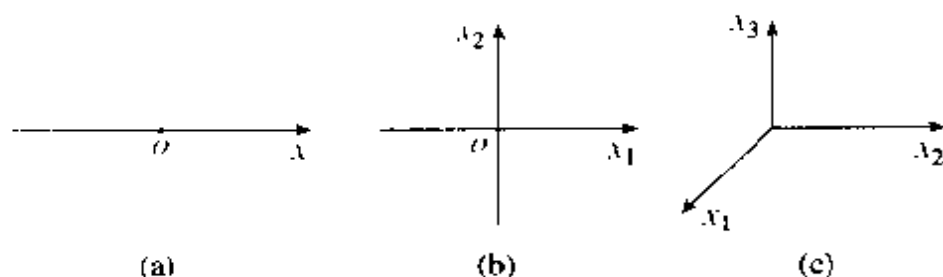


图 3.1

维数是一个极为重要的现代科学概念。系统思想要求人们在认识事物时克服单维度看问题的传统思维方式,转而采取多维度、全维度地看问题的思维方式。这也是整体地把握事物的一个重要方面。

状态变量是实变量,原则上可以在 $(-\infty, \infty)$ 范围内任意取值。但真实系统往往把状态变量限制于一定范围,如以 $a_1 \leq x_1 \leq b_1$ 、 $a_2 \leq x_2 \leq b_2$ 、 $\dots$ 、 $a_n \leq x_n \leq b_n$ 表示的范围,称为系统的相空间。在相空间之外取值的可能状态没有现实意义。为简化计,本书把相空间与状态空间看作一个概念。

维数 n 是独立决定系统状态的最小自由度。 n 可以取任何非负整数 $0, 1, 2, \dots$ 。理论上允许 n 为无穷大,在无穷维空间中讨论问题。状态空间可根据系统的数学特性分类,如状态变量离散地取值时,称为离散状态空间;连续地取值时,称为连续状态空间。

决定系统行为特性的还有另一类数量,它们反映环境对系统的制约,往往不直接由系统决定,称为环境参量。一般情形下这类量变化缓慢,与状态量显著不同,因而在一次观察或运行过程中可以看作常量。由于它们对系统行为特性有重要影响,有时可以改变系统的定性性质,又可在一定范围内调整控制,常称为控制参量。这两类系统量的划分是相对的。在一定条件下,为了降

低相空间维数，把某些变化相对缓慢的量作为控制参量进行分析计算，得出结论后再考虑它们的变化可能带来的影响。但在另外的条件下，把其中一些量当作状态量可能更合理些。

控制参量一般不止一个。以 m 记控制参量的个数，它可取任意正整数。 m 也是决定系统行为特性的宏观量。设系统的控制参量为 $c_1, c_2, \dots, c_m$ ，以它们为分量形成的 m 维向量 C ，

$$C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

称为系统的控制向量。在更大的时空尺度上看， c_i 也是变量，可以取不同的数值。以控制参量为坐标张成的空间，称为控制空间，或参量空间。 m 为它的空间维数。系统的许多行为特性、特别是定性性质的改变，要在控制空间才能看清楚。有时还要在状态空间和控制空间构成的乘积空间

$$V = \text{状态空间} \times \text{控制空间} \quad (3.3)$$

中研究系统。乘积空间的维数是 $n \times m$ ，一般只有 n 与 m 很小时才能得出有意义的结果。 $n \times m \leq 3$ 时，可以对系统作几何直观的描述。

输入量与输出量也是描述系统行为特性的重要变量。设系统有 k 个输入变量 $u_1, u_2, \dots, u_k$ ， l 个输出变量 $y_1, y_2, \dots, y_l$ ，以

$$U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_k \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

记输入向量，以

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

记输出向量。在许多情形下输出变量及其导数被当作系统的状态变量。

3.2 静态系统与动态系统

在状态空间中研究系统，中心课题是把握系统状态的演变规律。按状态与时间的关系，可把系统划分为两类。状态量不随时间而改变的系，称为静态系统；或静力学系统。描述静态系统主要关心的，一是输入量与输出量的对应关系（向量形式）

$$Y = f(U, C) \quad (3.6)$$

表示对于给定的输入向量 U ，输出向量 Y 的静态响应， C 为控制向量。如企业系统的投入产出关系，生理系统的刺激反应关系。 f 称为输出对输入的响应函数。二是性能指标 J 与输入量 U 的对应关系

$$J = \Phi(U, C) \quad (3.7)$$

J 可能是利润、效益、功率等。(3.6)、(3.7) 构成静态系统的数学模型。一般情形下，它们可用代数形式表达。

静态系统概念基于这样一个假设：系统状态的转移可以在瞬间完成。这意味着要求系统有无限多的储能可以利用。实际系统可以利用的能量是有限的，从甲状态到乙状态不可能瞬间完成，状态转移需要一定的过渡时间。但许多情形下，状态转变所需过渡时间比人们要考虑的过程短得多，允许忽略不计，静态假设近似成立。由于静态系统的描述和处理相当简单，在可能的情形下，人们总是忽略状态转移过程，用静态模型描述系统。

但在一般情形下，系统的状态转移明显呈现为一种过程，状态量是时间 t 的函数 $x(t)$ 。状态随时间而改变的系統，称为动态系统，或动力学系统。刻画动态系统必须用状态量的一阶导数 $\dot{x}$ （瞬时速度）、二阶导数 $\ddot{x}$ （瞬时加速度）等动态量。动态系统是非常普遍的。生命存续，机器运转，气象变化，市场波动，社会变革，国际关系格局的变动，心理活动，都是动态过程。一切实际存在的系统原则上都是动态系统，从适当的时间尺度去看都可以看到它们的动态特征。静态系统不过是动态系统的过渡过程短暂到可以忽略的极限情形而已。系统理论本质上是关于系统状态转移的动力学过程的理论。

动态系统的数学模型通常为系统的动力学方程，或称为演化（发展）方程。按演化方程得到以下系统分类。

（1）连续系统和离散系统

在实数集 $(-\infty, \infty)$ 或其闭子集 $[a, b]$ 上连续取值的时间 t ，称为连续时间。状态变量为连续时间函数的系统，称为连续系统。天体运行，液体流动，均为连续系统。连续系统的演化方程为微分方程，有高阶方程和一阶联立方程组两种形式。后者更便于描述状态变量之间的相互作用，其一般形式为

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_m) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_m) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_m)\end{aligned}\quad (3.8)$$

表示动态量 $\dot{x}_i$ (x_i 的变化速度) 由 n 个状态变量共同决定。或用向量形式表示

$$\dot{X} = f(X, C) \quad (3.9)$$

高阶微分方程表示的线性连续动力学系统的一般形式如下

$$x^{(n)} + a_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + a_1x^{(1)} + a_0x = 0 \quad (3.10)$$

在许多情形下，高阶方程与一阶联立方程组可以相互转换。

作为特例，本书将一再讨论以下一阶方程

$$\dot{x} = -\alpha x - \beta x^3 \quad (3.11)$$

这是经典动力学描述简谐运动的方程。现代科学发现，它在描述动态系统、自组织现象中有广泛的应用。

状态仅仅在离散时间上出现或被观察到的系统，称为离散系统。描述这类对象需要引入离散时间概念，即仅仅在分立的实数点序列上取值的时间 t ，如按小时、日、月、年等分立时刻取值。以年为单位统计人口，人口演化就被表示为一个离散动力学系统。通行的做法是取一个方便的起点为参考点，记作 0 时刻，以后的时刻顺序记为 $1, 2, \dots, n, \dots$ 。两个时刻 t 与 $t+1$ 之间的系统状态不考虑。离散系统的演化方程一般为差分方程

$$x(t+1) = f[x(t), c] \quad (3.12)$$

知道 t 时刻的状态变量 $x(t)$ ，由 (3.12) 可算出 $t+1$ 时刻的状态变量 $x(t+1)$ 。

作为特例，本书将经常讨论著名的逻辑斯蒂方程

$$x_{n+1} = \alpha x_n (1 - x_n) \quad (3.13)$$

或其等价形式

$$x_{n+1} = 1 - \lambda x_n^2 \quad (3.14)$$

上述两个方程描述的是 $n+1$ 时刻的状态量对 n 时刻状态量的依存关系。它的著名应用是在生态学中作为虫口模型，但也被应用于描述经济、文化等不同领域的动力学现象。

(2) 集中参量系统与分布参量系统

(3.8) 至 (3.14) 描述的系统，状态变量只是时间 t 的函数，与系统的空间分布特性无关，称为集中参量系统，动力学方程是常微分方程。如果状态变量与空间分布有关，必须考虑空间的不均匀性， x 为空间坐标 r 和时间 t 的函数 $x(r, t)$ ，则为分布参量系统。后者由于要考虑状态量在空间的变化速率，系统的动力学

行为须用偏微分方程描述，本书将不涉及。

(3) 自由系统和强迫系统

(3.8) 至 (3.14) 的右端没有反映外部作用的项，动力学过程是由初值扰动引起的，称为自由系统。方程

$$\dot{X} = f(X, C) + F(t) \quad (3.15)$$

描述的是强迫系统，时间函数 $F(t)$ 为外界强加于系统的作用。常值外作用可以作为控制参量来处理，化为自由系统。初值和外部作用均可引起系统的动态过程。

(4) 自治系统与非自治系统

(3.8) 至 (3.14) 的右端没有明显地依赖于时间 t ，称为自治系统。明显依赖于时间 t 的是非自治系统，一般向量形式为

$$\dot{X} = f(X, C, t) \quad (3.16)$$

非自治性的来源有二：一是存在依赖于时间的外作用项，即强迫系统 (3.15)；二是方程系数为时间函数，称为变系数系统。

以上均为按动力学规律（动力学方程）对系统的分类。

3.3 轨道 初态与终态 暂态与定态

演化方程 (3.8) 表示状态变量之间相互影响、制约的方式和程度，系统行为必须满足这种制约。演化方程的每个解 $X(t)$ 代表系统的一个行为过程，即状态随时间而变化的动态过程。研究演化方程解的特性，是动态系统理论的基本任务。最理想的定量方法是求出方程的解析解，用分析数学工具彻底把握系统的行为特性。但能够得到解析解的方程是很少的。借助计算机求其数值解，这种近似方法更有效。定性方法基于相空间概念，绕开求解方程的难关，通过分析方程结构和参量变化去描述解的定性特征，不仅直观形象，而且能揭示解的一系列本质特性，是动态系统理论

的基本工具之一。

用几何方法描述系统,可以借助时间域上的曲线表示其行为,如图 3.2 所示。这是一个 2 维系统,状态变量为 x 、 y , 每个解对应平面上的一条曲线,叫做系统在时间域上的轨道。图 3.3 是在

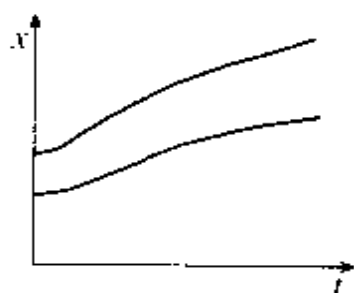


图 3.2

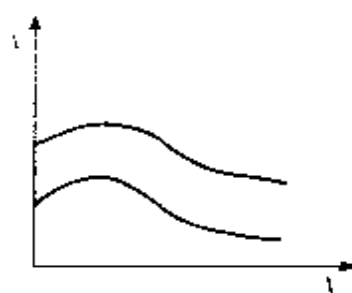
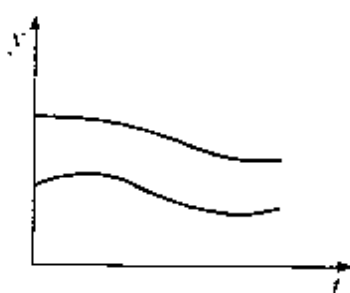


图 3.3

相平面中表示的系统行为,时间 t 被隐去,称为相轨道。相空间的点(状态)称为相点。系统演化表现为相点在轨道上的运动,轨道又叫做流线。一条相轨道代表系统的一个行为,反映各个状态变量在时间演化中的相互依存关系。相空间的每个点都有一条轨道通过,并且只有一条轨道通过。相空间充满各种各样的轨道,每条轨道不自交,不同轨道互不相交。一条轨道可能只包含一点,或者由有限个点组成(离散系统),或者为一条曲线,包括封闭曲线。高于 2 维的系统的轨道还可能是封闭环面上的曲线。复杂的轨道也可能是某个分形点集合。运用几何方法可以确定相空间中轨道的可能类型及其分布,从而对系统的全部动态行为作出整体的刻划。

相空间中有无穷多条轨道。根据微分方程理论,确定系统(3.8)的一个解需要给定它的初始条件,不同初始条件一般对应不同的轨道,即不同的系统行为。一个动态过程开始时刻 t_0 (通常取 $t_0=0$) 的状态 x_0 , 称为系统的初态(初值,初始条件)。相空间的每个点都有资格作为初态。动力学认为,初态的获得与系统

的动力学规律无关，是扰动因素独立作用的结果。^①

一旦系统在 t_0 时刻获得初态 $X_0 = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$ ，就会沿着通过 X_0 的那条轨道演化，从而启动一个动态过程。一个动态过程在终了时刻 $t = \infty$ 时趋向的有限状态 X_∞ ，称为系统的终态。一个动态过程可能没有终态，当 $t \rightarrow \infty$ 时， $X(t)$ 没有有限极限。具有实际意义的是存在终态的过程。动态系统理论关心的首要问题是系统的终态行为。是否存在终态？终态的类型？终态在相空间如何分布？都是动态系统理论研究的重要问题。

动态系统有两类可能的状态。系统可以在某个时刻到达但不借助外力就不能保持或者不能回归的状态，称为暂态或瞬态。系统到达后若无外部作用将保持不变或可以回归的状态，称为定态^②。图 3.4 示意一个小球在凹凸线上的运动，代表一个有势系统，线上的每个点都是一个可能状态。(a) 中凹线最低点为定态，其余点均为暂态。(b) 中凸线最高点为定态，其余点均为暂态。(c) 可看作两个 (a) 和一个 (b) 的复合系统，有三个定态点。



图 3.4

动态系统具有不同类型的定态。最简单的一类定态用数学中

① 这个假定反映了机械论的影响。如普利高津所说：“在态与规律中一定存在某种关系，因为态是以前的动力学变化的结果。”（普利高津：《从存在到演化》，212 页，上海，上海科学技术出版社，1986。）初态是系统在扰动作用下按自身运动规律演化的结果。克服这一弊病，有待新的动力学理论。

② 经典动力学的定态只指保持不变的平衡态，本书用的是广义的定态概念，包括各种非平衡定态。

的奇点或不动点来表示。系统 (3.8) 的不动点定态是满足以下条件的解

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \cdots = \dot{x}_n = 0 \quad (3.17)$$

(3.17) 称为不动点方程。所谓不动点，意即在这种点上，各状态量的变化速度均为 0。不动点代表系统的平衡态或均匀态，虽然只是相空间的孤立点，却是一定的相轨道，代表系统的一类定态行为，即平衡态或近平衡态行为。形象地说，系统在这些点上的行为特点是“坐着不动”。按其附近轨道的动态特性，不动点又细分为以下 4 种基本类型：

- (1) 中心点；
- (2) 结点；
- (3) 焦点；
- (4) 鞍点。

它们的特点将在下节讨论。

1 维系统只可能有不动点型定态。2 维以上的系统还可以有环型定态。图 3.5 示意的是一个 2 维系统的环型定态，由相平面的一条封闭曲线表示，数学中叫做极限环。图 3.6 所示为一个 3 维系统的空间极限环，由 3 维相空间的一条封闭曲线表示。极限环代表系统的周期运动。形象地说，这种定态行为的特点是按固定线路“绕圈子”。3 维以上的系统还可能出现更复杂的周期运动，用 2 维或多维环面表示。准确地说，环面代表的是由不同频率的周期运动合成的复杂周期运动，叫做准周期运动（本书将不涉及）。

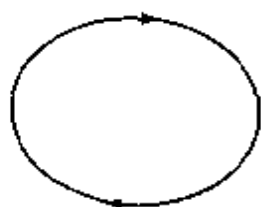


图 3.5

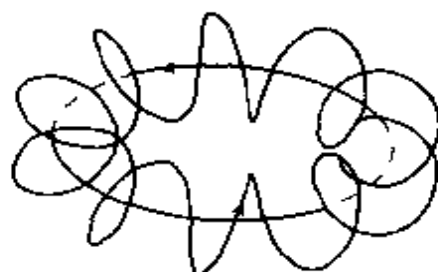


图 3.6

寻求动态方程的周期解要比求不动点复杂得多，不同情况下需用不同的方法，往往要化为不动点来求。如通过坐标变换化为极坐标形式，原来的周期解就成为极坐标中的不动点。高维系统常用彭加勒截面法求周期解，相空间的周期轨道反映在截面上就是相关映射的不动点。

3 维以上的连续系统还可能出现更复杂的定态行为，如以相空间的分形结构描述的混沌运动（见第 9 章）。

上面的分析表明，维数是决定动态系统行为的重要因素。就连续系统看，1 维系统的行为简单，因为“舞台”太小，施展不开，只能有平衡态行为。2 维系统较为丰富，既有平衡态，又有周期态。3 维以上系统可能有平衡态、周期态、准周期态、混沌态等各种定态行为。维数越高，定态行为越丰富多样。

动态系统的行为轨道有两大类。由暂态点组成的轨道代表暂态行为或瞬变行为，由定态点组成的轨道代表定态行为。定态行为就是终态行为，因为只有到达定态，状态转移过程才算结束。动态系统理论主要关心的是定态行为。有无定态，定态的类型和数目，不同定态在相空间的分布，如何从一种定态向另一种定态转移，等等，是动态系统理论的基本课题。

3.4 稳定性

描述系统的动态特性，首先要判明它是稳定的还是不稳定的。系统是在充满各种扰动因素的环境中产生出来并存续运行的，受到扰动后能否恢复和保持原来行为的恒定性，就是稳定性问题。新生系统只有具备稳定机制，才能保持刚刚建立起来的结构和特性，保存已积累的信息，避免昙花一现。稳定性是系统的重要维生机制，稳定性愈强，意味着系统维生能力愈强。从实用角度看，只有满足稳定性要求的系统，才能正常运转并发挥功能。

但稳定性是一个复杂的问题，在不同的系统现象和实际背景下，需要不同的概念来描述。作为一种动力学特性，系统理论关心的首先是轨道的稳定性，亦即演化方程解 $X(t)$ 的稳定性。通常采用李亚普诺夫的稳定性定义。

定义 3.1 设 $X = \Phi(t)$ 是向量微分方程 (3.9) 的解，定义在 (t_0, ∞) 上，初态为 $\Phi(t_0)$ ；初值扰动 $X_0 = X(t_0)$ 对应的轨道为 $X(t; t_0, X_0)$ 。如果对于足够小的 $\varepsilon > 0$ ，总有 $\delta > 0$ ，使得只要

$$|X_0 - \Phi(t_0)| < \delta \quad (3.18)$$

就有

$$|X(t; t_0, X_0) - \Phi(t)| < \varepsilon \quad (3.19)$$

则称解 $\Phi(t)$ 是李亚普诺夫意义下稳定的，简称 $\Phi(t)$ 是 L 稳定的。否则，称 $\Phi(t)$ 是李亚普诺夫意义下不稳定的，简称解 $\Phi(t)$ 是 L 不稳定的。

$\Phi(t)$ 是从初态 $\Phi(t_0)$ 出发的轨道， $X(t)$ 是从初态 $X_0 = X(t_0)$ (扰动的结果) 出发的轨道， $X_0 \neq \Phi(t_0)$ 。(3.18) 表示初态偏离小于 δ ，(3.19) 表示两条轨道在一定时刻后的全过程中每一时刻 t 的偏差都小于任意指定的小数 ε 。按定义 3.1， L 稳定意味着只要扰动 (初值偏离) 足够小，轨道的偏离也足够小。初值小扰动只能引起轨道的小偏离，这样的系统有能力保存自己并发挥功能。图 3.7 在时间域上示意了轨道的 L 稳定性。

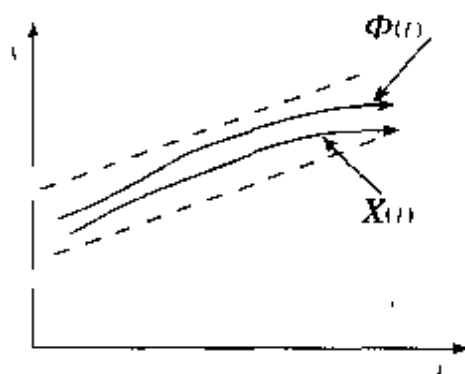


图 3.7

定义 3.2 设方程 (3.9) 的解 $X=\Phi(t)$ 是 L 稳定的。如果存在 $\eta>0$, 使得只要

$$|X_0-\Phi(t_0)|<\eta \quad (3.20)$$

就有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |X(t; t_0, X_0) - \Phi(t)| = 0 \quad (3.21)$$

则称解 $\Phi(t)$ 是李亚普诺夫意义下渐近稳定的, 简称为 L 渐近稳定的。

(3.20) 仍表示初值偏离足够小, (3.21) 表示初值扰动 X_0 引起的轨道偏离随时间延伸而趋于 0。 L 渐近稳定是对稳定性更严格的规定, 要求误差最终完全消除, 回到原轨道。图 3.4 (a) 所示小球系统的平衡态就是 L 渐近稳定的。

以上定义的稳定性是系统的局部性质, 只要求在初值的某个领域内成立, 称为局部稳定性。下面讨论各类定态轨道的稳定性。

中心点 看图 3.8 所示的 2 维系统。坐标原点为不动点, 代表平衡运动。周围布满封闭轨道, 代表不同扰动产生的不同周期运动。只要扰动足够小, 周期运动对原点的偏离也足够小。因此, 中心点是 L 稳定的, 但不是 L 渐近稳定的。

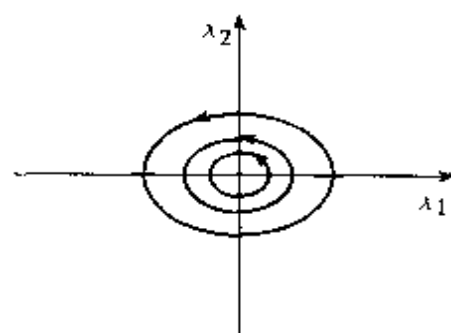


图 3.8

焦点 这类不动点的特点是, 它周围布满了螺旋形的相轨道, 从附近任一点出发的轨道都是以不动点为焦点的螺旋线, 分为稳

定焦点和不稳定焦点两种。图 3.9 为稳定焦点，(i) 为相图，轨道由外向焦点卷去；(ii) 为相应的时间域轨道，振荡式地向不动点收敛。图 3.10 为不稳定焦点，(i) 为相图，轨道向远离不动点的方向卷去；(ii) 为相应的时间域轨道，振荡式地从焦点向外发散。两者的不动点都位于坐标原点。

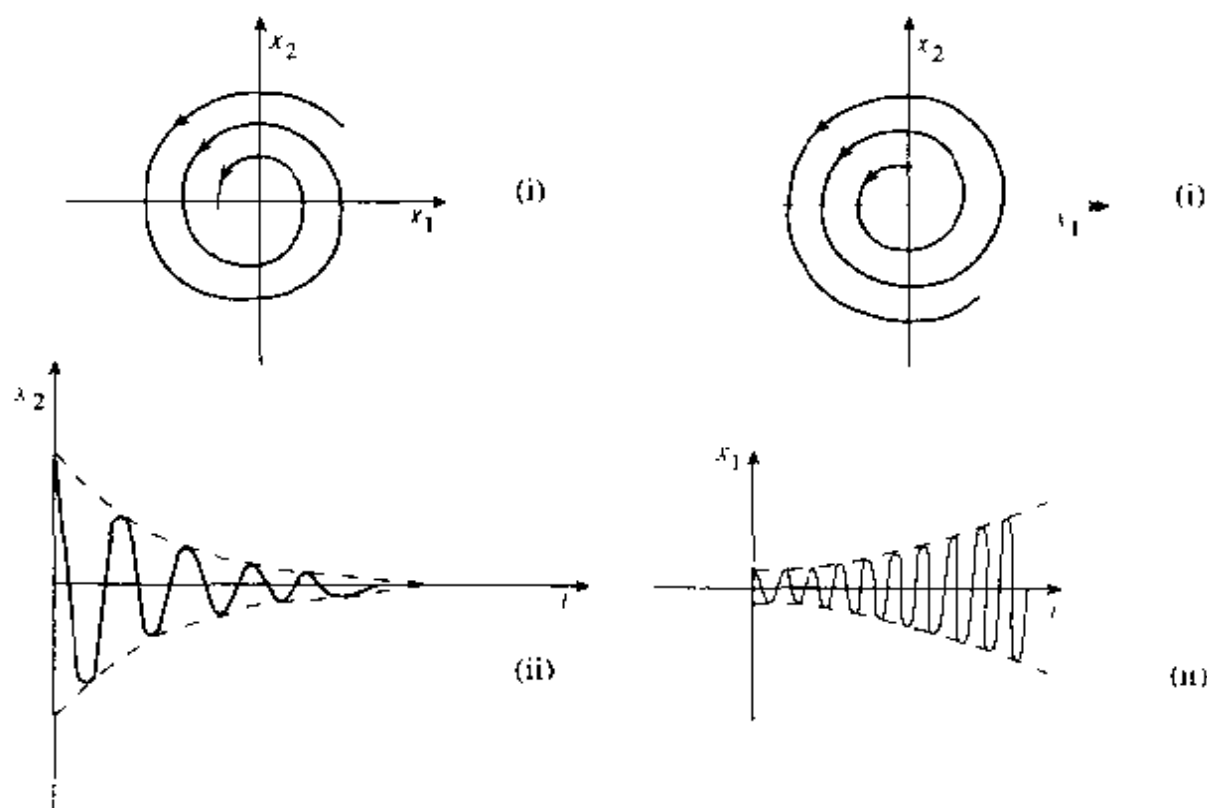
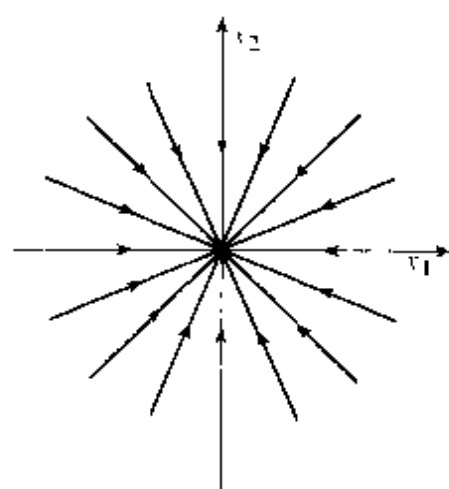


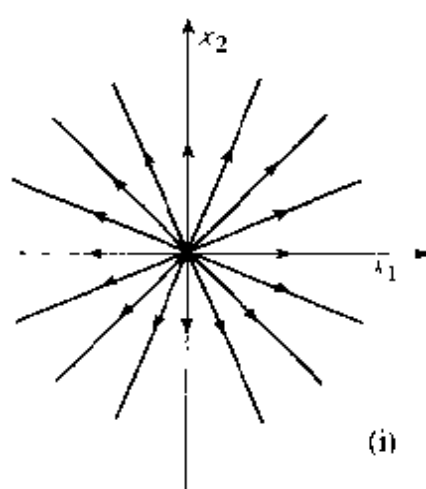
图 3.9

图 3.10

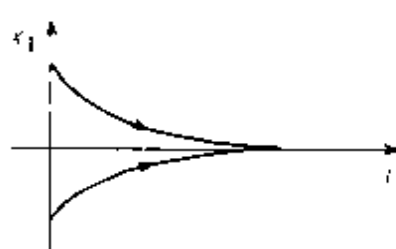
结点 这类不动点的特点是，在相空间中由该点附近出发的轨道不是螺旋形的。在正规情形下，相轨道是从不动点向外发出的直线。也分稳定结点和不稳定结点两种。图 3.11 是稳定的正规结点，图 3.12 是不稳定的正规结点。在稳定情形下，轨道向结点收敛。在不稳定情形下，轨道由结点向外发散。正规结点的时间轨道是单调变化的。图 3.13 是非正规稳定结点， $x_2(t)$ 是非单调曲线，但只有半次振荡。不动点也在坐标原点。



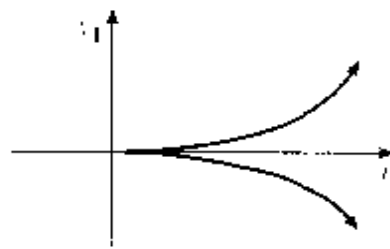
(i)



(ii)



(iii)



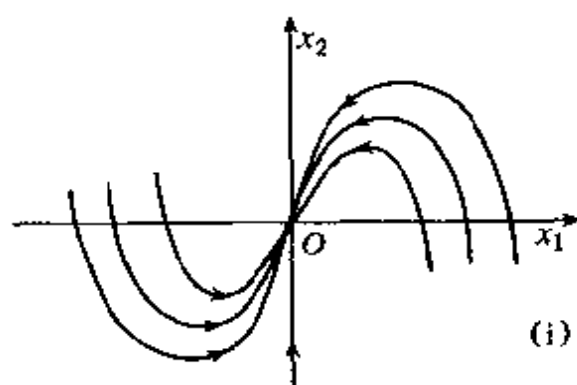
(iv)

图 3.11

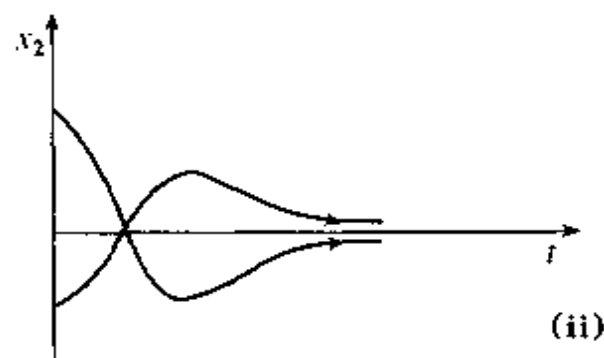
图 3.12

鞍点 这类不动点的特点是，有两条相轨道从相反的方向向不动点（坐标原点）收敛（稳定轨道），有两条相轨道从不动点向相反的方向发散（不稳定轨道）。周围的相空间被分为 4 块，每一块中的轨道都是先向鞍点逼近，然后又远离鞍点而去，如图 3.14 所示。鞍点是稳定性（由两条稳定轨道代表）和不稳定性（由两条不稳定轨道代表）的统一，但总体上不稳定。这种特性使鞍点在系统演化中起着十分奇特而重要的作用。

极限环 极限环也有两种基本情形。图 3.15 是稳定极限环，环外的轨道向内卷去，逐步趋向极限环；环内的轨道向外卷去，逐步趋向极限环。图 3.16 是不稳定极限环，环外的轨道向外卷去，逐步远离极限环；环内的轨道向内卷去，逐步远离极限环。有时



(i)



(ii)

图 3.13

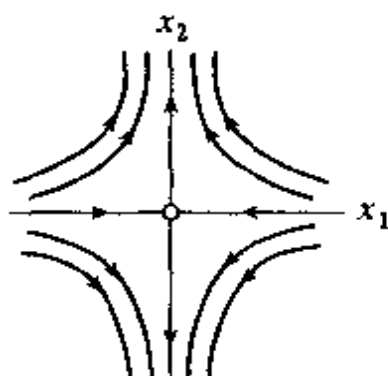


图 3.14



图 3.15



图 3.16

还可见到单边稳定的极限环，或者内外轨道都向外卷去，或者内外轨道都向内卷去。

定态点的稳定与否是按其附近的轨道特性刻划的。由定态点的分类及其稳定性的分析，可以对相空间的系统行为作出细致的描述。

所谓轨道稳定性，是系统的内部稳定性。许多情形下还要考察系统的外部稳定性，即输入-输出稳定性 (I/O 稳定)。简单地说，

如果对于一个有界输入 $|u(t)| \leq k_1$, 存在有限时刻 T , 在 $-\infty < T < t < \infty$ 内只能产生一个有界输出 $|y(t)| \leq k_2$, 就说系统是 I/O 稳定的。其中, k_1 、 k_2 都是有限数。简言之, 有界输入必定产生有界输出的系统是 I/O 稳定的。

给定系统的演化方程, 如何判别稳定性是动态系统理论的重要课题。如果能求得解析解, 问题很容易解决。在没有解析解的情形下, 需要有稳定性判据。所谓罗斯判据、奈魁斯特判据等, 属于技术科学层次的稳定性判据。李亚普诺夫函数属于基础科学层次的判据 (见第 5 章)。

3.5 目的性与吸引子

近代科学把目的性当作一个形而上学范畴, 带有神秘性, 因而排除于科学概念之外。对于描述机械运动之类简单系统, 不用目的概念是可以的。但在研究复杂系统问题时, 特别是生命、社会、思维运动及自动机器, 目的概念是不可或缺的。系统科学发现, 目的性并不神秘, 它不过是系统的一种动力学特性, 可以用吸引子概念精确刻画。

从相空间看, 系统演化的目的体现为一定的点集合, 代表演化过程的终极状态, 即目的态, 具有如下特征:

(1) 终极性 处于非目的态的系统“不安于现状”, 力求离之远去, 处于目的态的系统“安于现状”, 自身不再愿意或无力改变这种状态;

(2) 稳定性 目的态是系统自身质的规定性的体现, 这种规定性只有在稳定状态中才能确立起来并得到保持, 不稳定状态不可能成为目的态;

(3) 吸引性 吸引性是目的性的根本要素, 没有吸引力的状态不能成为系统演化所追求的目标。只要系统尚未到达目的态, 现实状态与

目的态之间必定存在非 0 的吸引力,牵引着系统向目的态运动。

非形式地说,相空间中满足以上 3 个条件的点集合 A (可能包含 1 个点、有限个点或无限个点),被称为动力学系统的吸引子。由于 (1),一切暂态均被排除,吸引子只能是定态。由于 (2),一切不稳定的焦点、结点、极限环以及鞍点均不可能充当吸引子,吸引子必须是稳定态。由于 (3),稳定而无吸引性的定态被排除于吸引子的候选行列,如中心点、退化结点等。乍看起来,稳定性与吸引性是一致的。其实不然,存在有吸引性但并非 L 稳定的定态,所有轨道在 $t \rightarrow \infty$ 时收敛于该点,但要经历很长的旅途,在回来之前可以远离定态^①。只有渐近稳定的定态才是系统的吸引子,代表系统的目的态。

凡存在吸引子的系统,均为有目的的系统。从暂态向渐近稳定定态的运动过程,就是系统寻找目的的过程。如钱学森所说:“所谓目的,就是在给定的环境中,系统只有在目的点或目的环上才是稳定的,离开了就不稳定,系统自己要拖到点或环上才能罢休。”^② 一切存在吸引子的系统,在演化过程中均表现出这种“不达目的不罢休”的行为特征。

作为相空间点集合的吸引子,其维数必定低于空间的维数。低维性是吸引子的重要特征之一。稳定定态表征系统的本质特性。从初态向吸引子的演化过程是系统确立自身规定性的过程,从不确定性中寻找确定性的过程,必须对各种信息进行过滤、选择、压缩,必须忘记初态(不论从何种初态开始,都走向同一目的态)。同维的信息压缩不足以确立系统的特有规定性,只有从高维相空间压缩到低维的吸引子上,系统才能“忘记”初态,确立自身的

① 参见 Steven H. Strogatz: Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics biology, chemistry and engineering, Figure 5.1.6, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.

② 钱学森等:《论系统工程》,增订本,245 页,长沙,湖南科学技术出版社,1988.

规定性。系统寻找目的态的过程必定是降维的过程。

1 维系统只能有 0 维吸引子（不动点），2 维系统可以有 0 维和 1 维（极限环）吸引子，3 维系统可以有 0 维、1 维和 2 维（环面）吸引子。一般地， n 维系统可以有 0 到 $n-1$ 维的各种维数的吸引子。复杂系统的吸引子还可能不是整数维的点集，而是具有分数维的点集，即相空间的分形集，叫做奇怪吸引子（见 9.2 节）。迄今发现的吸引子有以下几类。

I 不动点，代表平衡态和近平衡定态行为。

II 极限环（及环面），代表周期（及准周期）运动。

III 奇怪吸引子（分形吸引子），代表混沌运动。

I、II 两类吸引子代表简单有序运动，由相空间的规则几何图形刻画，称为平庸吸引子。奇怪吸引子代表复杂有序运动，将在第 9 章进一步讨论。

圣塔菲（Santa Fe）学派认为，存在另一类吸引子，称为“复杂性（complexity）”或“混沌边缘”，记作 IV。4 种类型的关系为

$$I \text{ 及 } II \rightarrow \text{IV} \rightarrow III$$

这个序列表示了动力学系统的演化序列：

$$\text{秩序} \rightarrow \text{IV} \rightarrow \text{混沌}$$

这里的“复杂性”指第 4 级细胞自动机规则（见 7.9 节）所显示的、永远出人意外的变动行为。^①这是一个新概念，它的许多性质和数学表示尚待探索。

一个系统可能没有吸引子，也可能同时存在多个吸引子。不同吸引子可能属于同一类型，也可能属于不同类型。原则上讲，几类吸引子的各种组合都可能出现。例如，同时存在几个结点，或同时存在不动点和极限环，或同时存在不动点、极限环、奇怪吸

^① 参见 M. M. 沃德罗普，《复杂——走在秩序与混沌边缘》，308 页，台湾，天下文化出版公司，1995。

引子，或同时有几个奇怪吸引子，等等。当相空间同时存在几个吸引子时，整个相空间将以它们为中心划分为几个区域，每个区域内的轨道都以该吸引子为归宿，称为该吸引子的吸引域或流域。当相空间只有一个吸引子时，一切收敛的轨道都以它为归宿，整个相空间为它的流域。若把相轨道比作地面上的雨水流线，江河湖泊便是它的吸引子，各有自己的流域。系统向哪个吸引子演化，取决于初态落在哪个吸引域，初态决定系统行为的长期走向。对于同一流域中的不同初态，系统具有“遗忘”机制，演化行为的最终走向与初态的选择无关，从不同初态开始的演化过程最终达到同一结果。图 3.17 示意了吸引子与吸引域的关系。

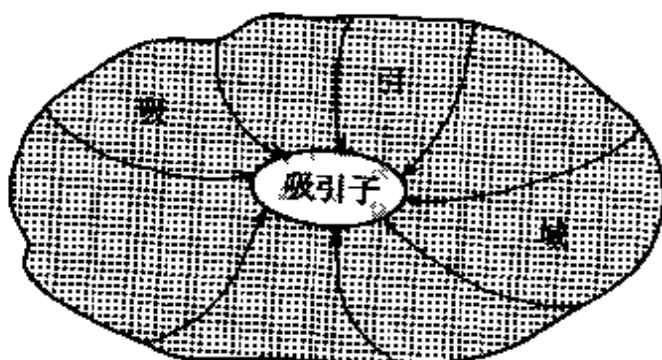


图 3.17

吸引子是刻画系统整体特性的概念，具有不可分割性，即不能把它划分为两个都满足定义要求的较小集合。也不能把几个吸引子组合为一个吸引子，如平衡态 A 与周期态 B 不能合成一个单一的吸引子。

建立了系统演化方程后，可以用数学语言回答下列问题：系统有无吸引子？有几个吸引子？有哪些类型的吸引子？吸引子在相空间如何分布？如何划分吸引域（即确定吸引域的边界）？等等。关于这些问题的一般结论，构成所谓吸引子理论。

处于不稳定定态的系统也“安于现状”，自身没有改变现状的动力。但他们对附近的轨道没有吸引力，反而有排斥力。一旦扰

动使系统离开这种定态,排斥力将使任何轨道远离该定态而去。由此缘故,不稳定的结点、焦点、极限环、环面被称为排斥子。图 3.4 (b) 的定态点就是一个点排斥子。图 3.16 是一个环排斥子。除这些平庸排斥子外,还存在具有分形结构的奇怪排斥子。相空间的分形点集应区分为稳定的与不稳定的两种,前者是奇怪吸引子,后者是奇怪排斥子。研究排斥子也是吸引子理论的重要内容。在动态系统理论中,排斥子又称为源,吸引子又称为汇。一切有实际意义的轨道总是从源流向汇。

3.6 分 叉

前面的讨论是在假定控制参量不变的情形下,仅在状态空间进行研究。但控制参量也是可变的,这种变化将会影响系统的行为特性。一般情形下,控制参量的变化只能引起系统的定量变化,属于平庸情况,系统理论不太关注。但在某些临界点上,控制参量的改变将引起系统定性性质的改变,即定态点的类型、个数、在相空间的分布以及稳定性的改变。例如,从有定态到没有定态或者相反,稳定定态变为不稳定定态或者相反,定态类型改变,等等。控制参量变化所引起的系统定性性质的改变,叫做分叉。分叉现象要在控制空间中考察。控制空间中引起分叉现象的临界点,叫做分叉点。研究分叉的定义、分叉发生的条件、分叉的类型、如何求分叉解、解的稳定性、解的对称破缺等,构成所谓分叉理论。

考察 1 维系统

$$\dot{x} = ax - x^3 \quad (3.22)$$

状态空间与控制空间均是 1 维的,乘积空间是以 a 和 x 为坐标而张成的 2 维空间。它的不动点方程是

$$ax - x^3 = 0 \quad (3.23)$$

当 $a < 0$ 时,只有一个实数解 $x = 0$,代表系统的稳定平衡态。

当 $a > 0$ 时, 有 3 个不动点: $x_1 = 0$, $x_2 = \sqrt{a}$, $x_3 = -\sqrt{a}$, 代表 3 个平衡定态。

容易证明, 此时的 x_1 为不稳定的, x_2 与 x_3 为稳定的。 $a=0$ 为分叉点, 当 a 从负向增大而跨过这一点时, 系统由一个定态变为 3 个定态, 定态 $x_1=0$ 由稳定变为不稳定, 标志着系统定性性质改变了。除了这一点, a 的变化只能引起系统的量变。

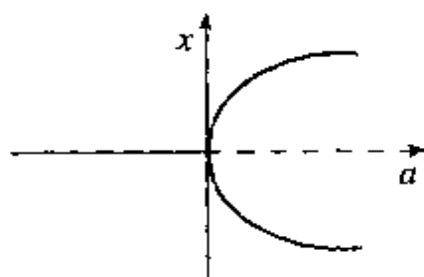


图 3.18

还可从另一角度看此现象。给定系统 $\dot{x} = f(x)$, 如果存在一个函数 $V(x)$, 使得

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -f(x) \quad (3.24)$$

就称该系统为有势的, 称 $V(x)$ 为它的势函数。(3.23) 是一个有势系统, 势函数为

$$V(x) = x^4 - \frac{1}{2}ax^2 \quad (3.25)$$

不动点是 $V(x)$ 的极值点。图 3.19 是控制参量引起的势函数变化。 $a < 0$ 时, a 的变化只能改变曲线的陡峭程度, 属于定量变化, 如左图。 $a=0$ 时如中图。如果 $a > 0$, 在非临界点时 a 的变化只能改变定态点 x_2 与 x_3 在 x 轴上的位置及势阱深度, 也属于定量变化; 但在跨越临界点 $a=0$, 出现的是两类定态结构的转变这种定性性质的改变, 如右图。

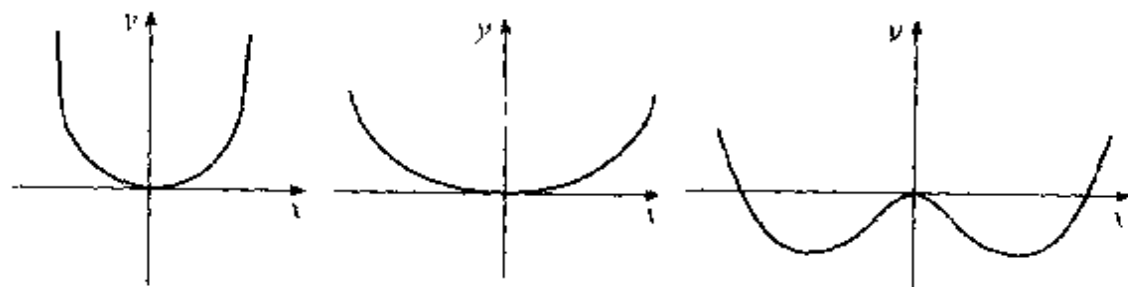


图 3.19

分叉是系统的动力学机制,因动力学方程的结构不同而不同。基本的类型有以下几种。

(1) 鞍结分叉

考察系统

$$\dot{x} = a + x^2 \quad (3.26)$$

$a > 0$ 时没有不动点, $a < 0$ 时有两个不动点 $x_1 = \sqrt{-a}$ 和 $x_2 = -\sqrt{-a}$, x_1 不稳定, x_2 稳定。 $a = 0$ 为分叉点, 因为当控制参量减小到分叉点时, 系统将发生定态点的创造 (从无到有) 或破坏 (从有到无)。这是定性性质的改变。由于 $a < 0$ 时的不动点为结点, $a = 0$ 时的不动点为半稳定的, 即一维鞍点, 不动点的破坏是通过结点退化为鞍点而实现的; 从 a 减小的方向看, 通过鞍点的出现而创造出结点, 故称为鞍结分叉。如图 3.20 所示。

(2) 跨临界分叉

考察系统

$$\dot{x} = ax - x^2 \quad (3.27)$$

不动点为 $x_1 = 0$ 和 $x_2 = a$ 。与 (3.27) 不同, 此系统在整个 a 轴上都有解, 不存在不动点的创造和破坏。但在 $a < 0$ 时, $x_1 = 0$ 是稳定的, $x_2 = a$ 是不稳定的; 在 $a > 0$ 时, $x_1 = 0$ 不稳定, $x_2 = a$ 稳定。稳定性发生交换, 属于定性性质改变, 故 $a = 0$ 为分叉点。由于不动点稳定性发生交换这种分叉现象是在控制参量跨越临界点时出现的, 因而称为跨临界分叉。图 3.21 描绘了这种情形。

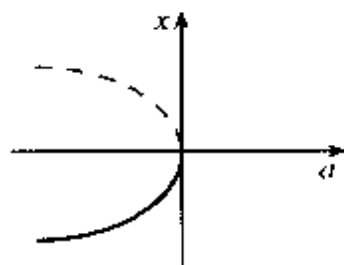


图 3.20

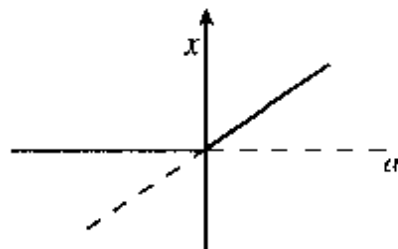


图 3.21

(3) 叉式分叉

典型的叉式分叉如图 3.18 所示。控制参量 $a < 0$ 时系统有一个由稳定不动点构成的分支，即 $x_1 = 0$ 。 $a > 0$ 时，分叉为由新的稳定不动点 $x_1 = \pm \sqrt{a}$ 构成的两个分支，原分支 $x = 0$ 变为不稳定的。由于分叉是在参数超过临界点 $a = 0$ 时出现的，故称为超临界叉式分叉。

系统

$$\dot{x} = ax + x^3 \quad (3.28)$$

也具有叉式分叉机制，零解 $x = 0$ 与超临界分叉相同。不同的是，分叉不是发生在 a 超过临界点 $a = 0$ 时，而是在 a 小于临界值时出现的，因而称为亚临界叉型分叉。另一特点是两个非 0 解均不稳定。图 3.22 描绘的是这种情形。

系统

$$\dot{x} = ax + x^3 - x^5 \quad (3.29)$$

具有图 3.23 所示的分叉机制。

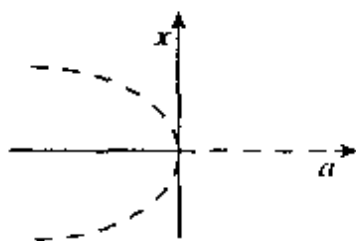


图 3.22

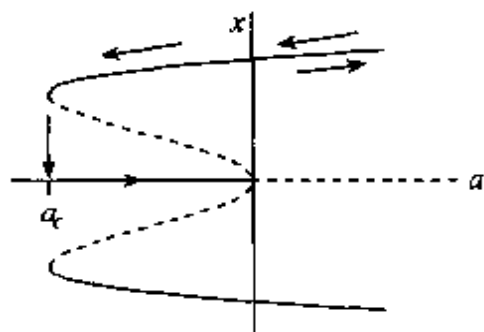


图 3.23

对于小 x ，当 $a < 0$ 时分叉类似于图 3.22， $x = 0$ 为稳定不动点，两个向后弯的分支是不稳定的， $a = 0$ 为临界点。由于 x^5 项的作用，存在另一个临界点 $a_c (< 0)$ ，跨过这一点出现两个大幅值的稳定不动点分支。当 $a_c < a < 0$ 时，有两种数值不同的稳定不动点可供选择。对于小的初态 x_0 ，系统取 0 值；对于大的初态 x_0 ，系统将从两个大幅值中选取一个。

(4) 霍普夫分叉

如图 3.24 所示,分叉前为焦点型不动点,分叉后为稳定极限环。

(5) 单极限环分叉

如图 3.25 所示。当控制参量变化到临界点时,原极限环失稳(虚线所示),同时分叉出两个稳定的极限环(实线所示)。

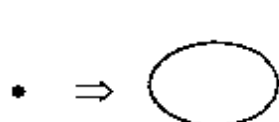


图 3.24

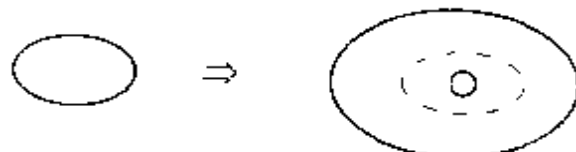


图 3.25

(6) 环面分叉

控制参量的变化还可能导致从极限环分叉出环面,或者从环面分叉出同维的其他环面,或者分叉出更高维的环面。

(7) 在更复杂的情形下,可以从平庸吸引子分叉出奇怪吸引子,或从一种奇怪吸引子分叉出另一种奇怪吸引子。

上面是从数学角度对分叉的描述。分叉并非只是一种数学现象。我们在物理世界、生命世界、社会领域、工程技术以及心理思维领域,都可以发现分叉现象,表明分叉是系统演化过程中广泛存在的一种动力学机制。系统演化之所以从单一到多样、从简单到复杂,分叉机制是重要根源。实际系统的演化过程中不止出现一次分叉,而是经历一系列的分叉,形成所谓逐级分叉序列,如图 3.26 所示。不断分叉,不断产生出新的分支,导致不断增加系统的多样性和复杂性。此图中只考虑了一种控制参量。实际系统涉及许多参量,它们或快或慢都在变化,因而分叉导致的复杂性增加就更为严重了。

图 3.26 表明,分叉把历史性赋予演化系统。系统后续演化所建立的定态,与它先前经历的分叉路线有关。现在的状态 S_1 和 S_2 ,分别是按 $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow S_1$ 路线和 $A \rightarrow B \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow S_2$ 路线演

化而来的，包含不同的历史积淀，造就出 S_1 和 S_2 的不同特征。分叉理论第一次揭示出物理系统也有历史性。

当分叉点上存在不止一个新的稳定分支解时，系统面临如何选择的问题。在一般情形下，几个新定态是对称的，有相同的机会接受选择。存在两种基本选择(对称破缺)方式。一是诱导破缺选择，环境中存在某种诱导力量，迫使系统对某个新态有所偏爱。二是自发破缺选择，几种新态被选择的可能性相同，完全由偶然因素决定。图 3.27 示意了一种诱导破缺选择。虚线代表没有外部诱导作用的破缺选择，实线代表诱导作用造成的破缺选择。

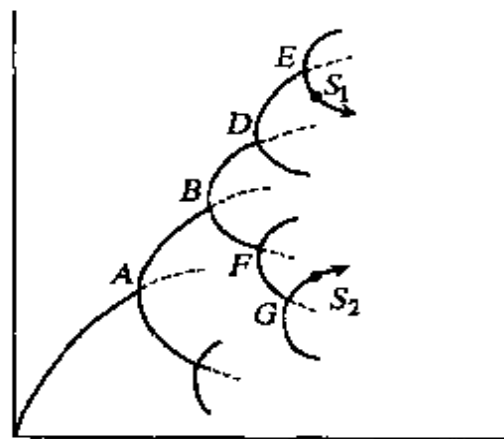


图 3.26

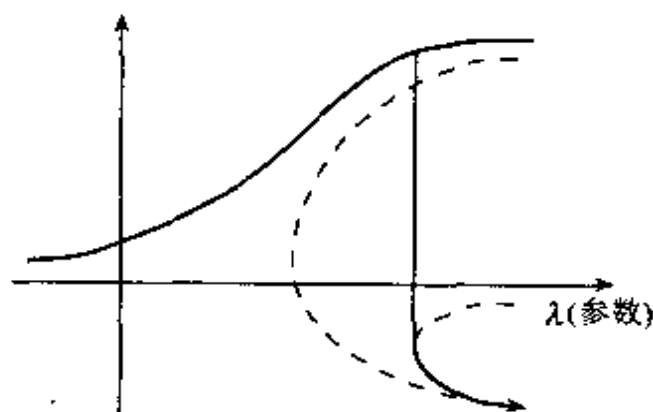


图 3.27

3.7 突 变

系统的演化行为有渐变与突变两种方式。基于微积分的经典数学充分研究了事物的渐变，却无法描述突变。基于微分方程定性理论的现代动力学指出克服这一困难的途径。分叉点上发生的系统定性性质改变，就是一种突变。有了前面的准备，现在可以讨论动力学的突变理论了。

渐变与突变的关系历来是科学与哲学激烈争论的问题。200年前的居维叶倡导灾变论，断言“没有缓慢作用的原因能够产生

突然作用的结果”。在他看来，缓慢变化的原因只能产生缓慢变化的结果，突发性的结果必定来自突发性的原因。这种把渐变与突变完全对立起来的观点，显然是机械论的。现代动力学承认渐变与突变、连续与离散是相互联系、相互转化的。阿诺德认为：“对世界的数学描述依赖于连续性和不连续的、离散的现象之间巧妙的相互作用。……从光滑、连续的结构中会出现离散的结构”^①。突发性原因导致突发性结果是一种平庸情形，渐变的原因导致突变的结果是一种非平庸情形，蕴藏着丰富的动力学内容。从这种科学和哲学的认识出发，突变理论明确规定它不研究一切突变现象，只研究在控制参量的缓慢变化中可能出现的系统定性性质的突变。

按照结构稳定性，动态系统可以分为三类：处处结构稳定的系统不可能发生突变，无研究的必要；处处结构不稳定的系统无法存在于现实世界，也无研究的必要；突变理论关心的是兼具结构稳定与结构不稳定的系统。更准确地说，这类系统在相空间几乎处处结构稳定，但在某些 0 测度的点集上存在结构不稳定性。这类系统具有丰富的动力学特性，可以发生渐变与突变的相互转化。在控制空间的结构稳定性区域中系统只有渐变，一旦走向边界就要出现从一种定态到另一种定态的突变。这就是突变理论研究的现象。

我们讨论一种典型情形。给定一个有势系统，其势函数为

$$V(x) = x^4 + ax^2 + bx \quad (3.30)$$

(3.26) 是它的特例。有势系统只有不动点型的定态点。此系统的平衡态（不动点）方程为

$$\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.31)$$

亦即

^① V. L. Arnold: 《突变理论》，英文第二版序，北京，高等教育出版社，1990。

$$4x^3 + 2ax + b = 0 \quad (3.32)$$

该系统有 1 维状态空间即 x 轴，和 2 维控制空间即 (a, b) 平面，构成 3 维乘积空间 $a-b-x$ 。系统的所有不动点形成乘积空间的一张三叶折叠曲面 M ，如图 3.28 所示。(i) 是行为曲面 M ，由奇点 $x=0$ 开始在折叠区内逐渐展开。中叶是势函数的所有极大点（不稳定不动点）的集合，上、下叶是极小点（稳定不动点）的集合。(ii) 是三叶折叠曲面在控制平面 $a-b$ 上的投影，折叠曲面中叶的两条边界（棱）投影到 $a-b$ 平面上得到由原点引出的尖顶曲线，有两个分支，其上每个点都是分叉点，故称为分叉曲线。分叉曲线是系统控制空间中的结构不稳定点集合。当控制参量 a, b 的变化没有到达分叉曲线时，系统只有定量性质的改变。当控制参量 a, b 变化到分叉曲线时，就会引起系统定性性质的突变，或者从上叶跳到下叶，或者从下叶跳到上叶。(iii) 是用适当平面截取行为曲面 M 所得到的截线，实线是极小点，虚线是极大点。这个系统显示突变理论与分叉理论有内在的联系。

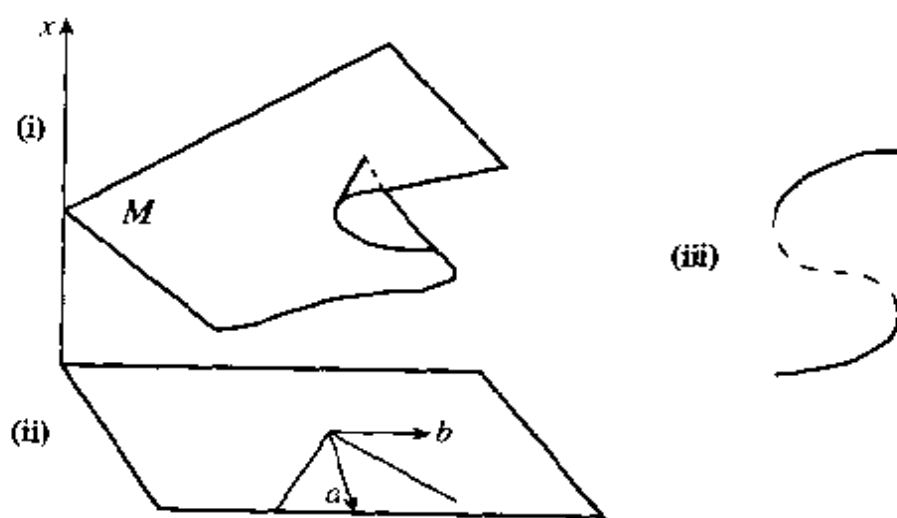


图 3.28

最简单的是折叠突变，但它的突变特征很不充分。尖顶突变是仅次于折叠突变的另一种最简单的突变形式，又几乎具备了突

变的所有基本特征：

(1) 多稳态 除折叠突变外，突变系统均具有两个以上的稳定定态，即对应于同一组控制参量，势函数有不同的极小点，因而可以发生从一个稳态向另一个稳态的变化。尖顶突变是双稳态。更复杂的系统还可能三个以上的稳态。

(2) 不可达性 在不同的稳定定态（极小点）之间存在不稳定定态，即极大点，它们是不可实现的定态，或者说是实际上不可能达到的定态。在尖顶突变中，三叶折叠曲面中叶上的点是不可达的。

(3) 突跳 在分叉曲线上，系统从一个极小点到另一个极小点的转变是突然完成的。在尖顶突变中，从上（下）叶到下（上）叶的过渡采取突跳形式。

(4) 滞后 如图 3.29 所示，在尖顶突变中，当控制参量沿路径 1 变化时首先碰上分叉曲线右支，但不发生突变，要到分叉曲线的左支的 α 点时，系统才发生突跳；沿路径 2 变化时，首先碰到的是左支，但要到达右支的 β 点时，才会发生突跳。这种现象称为滞后，反映突变的发生与控制参量变化的方向有关。

(5) 发散 在所谓退化定态点附近，控制参量变化路径的微小差别可能导致最终状态有很大不同。演化轨道对控制参量变化路径的这种敏感不稳定性，叫做发散。

突变并不仅仅是数学现象。桥梁断裂，锅炉爆炸，股市暴跌，国家政变，都是系统的突变。初等突变理论对有势系统的可能突变现象作了严格而透彻的分析，发现所谓托姆原理。这个原理断言：对于控制参量 $m \leq 4$ 的有势系统，存在 7 种基本突变，即折叠突变、尖顶突变、燕尾突变、蝴蝶突变、椭圆型脐点突变、双曲型脐点突变和抛物型脐点突变。对于 $m \leq 5$ 的有势系统，存在 11 种基本突变，除前述 7 种外，还有印第安人茅舍型、符号型脐点、第二椭圆型脐点、第二双曲型脐点等突变。 m 越大，基本突变的

类型越多，但原则上都是确定的。至于非有势系统的突变，是高等突变理论研究的课题，目前所知甚少。

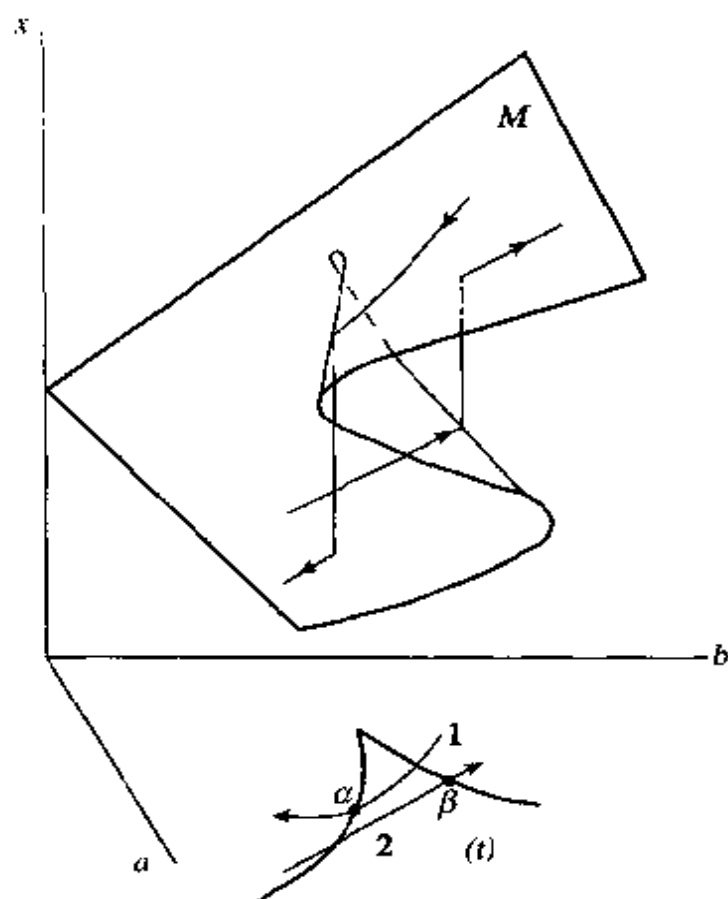


图 3.29

3.8 回归性与非游荡集

按照是否具有回归（回复）性，系统的可能状态有两类。在 $t \rightarrow \infty$ 的过程中一去不复返的状态没有回归性，反复出现的状态具有回归性。严格的回归性要求完全回复到该状态，一般的回归性只要求回到该状态的附近。有限次回归后便逃逸掉的状态，仍无回归性，只有在 $t \rightarrow \infty$ 过程中无限次的回到其附近的状态，即永不

逃逸的状态,才真正具有回归性。回归的方式可以是有规则的,也可以是无规则的。通常所谓“循环往复”,“螺旋前进”,“似曾相识燕归来”,“历史有惊人的相似之处”,说的都是动态系统的回归性。

数学家把相空间中不具回归性的相点(状态)称为游荡点,把具有回归性的相点称为非游荡点。系统的动力学方程(以 φ 记之)可视为一种操作变换,把 φ 施加于初态 x_0 ,在 $t \rightarrow \infty$ 过程中可以得到从 x_0 出发的那条轨道上的所有点;把 φ 施加于不同的初态,经过变换可以得到相空间的所有点。令 $\varphi(C)$ 记对点集 C 中所有点施行变换 φ 后得到的点集,有如下关于游荡点和非游荡点的定义。

定义 3.4 令 V 记相点 x 的一个邻域,若存在实数 $\tau > 0$,当时间 $t > \tau$ 时,有

$$\varphi(V) \cap V = \emptyset (\text{空集}) \quad (3.34)$$

则称 x 为 φ 的一个游荡点;其余的点称为非游荡点。相空间中所有非游荡点的集合称为 φ 的非游荡集,记作 Ω 。

人们总是希望根据以往的事件预见未来。只有那些具有回归性的行为才是可以预测的。因此,人类在理论和实践上关注的中心总是具有回归性的行为。动态系统理论表明,系统的全局特性基本上取决于非游荡集 Ω 及其附近轨道的特性。动态系统是否存在非游荡集 Ω , Ω 集的构成和特性如何,是动态系统理论研究的重要问题。

存在不同类型的回归行为。每一种定态都代表一类回归行为。焦点、结点和鞍点的 Ω 集通常只有一点,即该不动点自己。退化结点的 Ω 集可能是整个 x 轴。中心点的 Ω 集为整个相空间,任一相点都是非游荡的,在 φ 的变换下不会逃逸。不动点代表的是最平庸的非游荡集,它是在保持平衡状态不变的意义上表现回归性的。极限环和环面是较为复杂的非游荡集,特点是变动不居但每个状态都可以严格重复,且是有规则的重复。不动点、极限环和环面

都是平庸的非游荡集。真正复杂的非游荡集是奇怪吸引子，在 $t \rightarrow \infty$ 的过程中，系统无数次地回到每个状态的附近，但并不严格回归，且这种回归是非周期的、无规则的。

研究非游荡集的一个重要模型，是斯梅尔 60 年代提出的马蹄变换。有兴趣的读者可参看有关的动力学著作。

3.9 瞬态特性与过渡过程

充满相空间的轨道可分为瞬态和定态两类，分别描述系统的瞬态行为过程和定态行为过程。所谓瞬态过程，并非说这种过程是短暂的，甚至是瞬间完成的，而是说它是由一系列瞬态组成的。由于分析数学建立在实数连续统上，瞬态行为原则上是一种无穷过程，要在 $t \rightarrow \infty$ 时才能完成。定态行为原则上是一种有穷过程。

从状态空间看，系统的本质特征是由定态规定的，瞬态无关紧要。在回答“系统的本质规定性是什么”的问题时，系统理论关注的中心是定态而非瞬态，即使讨论瞬态，也是为了讨论定态，通过与瞬态的比较来说明定态。但是系统的定态点是相空间的 0 测度集合，相空间几乎是由瞬态组成的。任意从相空间取一点，取到定态的概率为 0，取到瞬态的概率为 1。尽管原则上初态可以取在定态轨道上，但概率为 0，实际的初态均取为瞬态，定态的建立总是通过瞬态过程而达成的。因此，为了阐明“系统获得其本质规定性的方式和过程”的问题，系统理论必须研究瞬态行为。

动力学系统的瞬态行为也分两类。一类是不向任何定态收敛的瞬态，另一类是向吸引子收敛的瞬态。一条向吸引子 A 收敛的瞬态轨道，随着过渡过程的延伸，瞬态的特性越来越接近定态 A 的特性，辨别是瞬态还是定态也越来越困难。如向极限环收敛的螺旋轨道越来越接近封闭的环，即周期运动；向奇怪吸引子收敛的周期轨道越来越接近非周期的混沌运动。这就增加了如何判断

过渡过程是否结束的困难。

由于微分方程理论建立在实数连续统上，任何动态过程只能在 $t \rightarrow \infty$ 时越来越逼近终态，不可能实际上到达终态。但现实世界不是连续统，由于存在干扰、噪声等因素，实际的动态系统均可在有限时间内到达终态。实际系统也不要求绝对到达终态，只要和终态的差距足够小，就被认为过渡过程结束了。因此，过渡过程概念是有意义的。在动力学中，这样的过渡过程被认为是短期行为，终态则被认为是长期行为。

从吸引域边缘的排斥子轨道附近开始的瞬态行为要经历一个走出排斥子的过渡过程。靠近排斥子的瞬态具有与排斥子定态相近的特性，难以区分。特别是存在奇怪排斥子时，由于它的复杂分形结构，在演化的初期可能要经历相当长的、复杂曲折的过程才能离开奇怪排斥子。在分叉点上，原吸引子失稳而成为排斥子，迫使周围的轨道离开原定态去追求新的吸引子。但在过程开始的一段时间内，原定态的影响很强，新定态的影响很弱，走出原定态的影响范围是一种复杂的动态过程。如何快速而顺利地摆脱已经失稳的原定态的影响，是具有重大理论和实际意义的问题。这是过渡过程理论的基本课题。处于社会改革时期的人们对于摆脱旧体制的艰难都有深切的体会，摆脱旧体制的过程就是走出排斥子的过程。

思 考 题

1. 什么是系统的动力学特性？动力学是关于事物发展动力的科学吗？
2. 列举经济、政治、科学、文化等发展过程中的动力学现象。
3. 您的人生阅历中有过哪些重要的分叉现象？试用分叉理论阐明个人智力发展和社会贡献的差别的来源。

4. 从系统科学原理看稳定与发展的辩证关系。
5. 试析确定性动力学中的机械论影响。

阅 读 书 目

1. S. H. Strogatz: Nonlinear dynamics and chaos; with applications to physics, biology, chemistry and engineering, chapter 1~8, Addison-Wesley publishing Company, 1994.
2. J. M. T. Thompson, H. B. Stenmit: Nonlinear Dynamics and Chaos; Geometrical Methods for Engineers and Scientists, Preface, Chapter 1、2、3, John Wiley and Sons Ltd., 1986.
3. H. 哈肯:《高等协同学》, 导论, 北京, 科学出版社, 1989.
4. 刘式达、刘式适编著:《非线性动力学和复杂现象》, 第2、3、4、5章, 北京, 高等教育出版社, 1989.
5. 普利高津、斯唐热:《从混沌到有序》, 上海, 上海译文出版社, 1987.

第4章 线性系统理论

数学模型是由描述系统的变量和常量构成的数学表达式。不论静态系统还是动态系统，只要建立了数学模型，首先就要区分系统是线性的还是非线性的。几百年来，科学研究的主要对象是线性系统。依据这些成果，系统科学建立了十分完整而成熟的线性系统理论，获得广泛应用。但现代科学正在转向以非线性系统为主要对象，未来的科学本质上是非线性科学。这种发展趋势要求系统科学提供一套完整而有效的非线性系统理论。描述和处理非线性系统的理论和方法应是系统科学的主体，也是本书的主要内容。但我们必须从线性理论讲起。这不仅由于目前真正成熟的、体系化了的内容主要是线性理论，还在于线性理论是非线性理论必要的基础性知识准备，线性理论的结论和方法对于解决非线性问题有重要应用。例如，构造非线性方程的解往往要利用线性方程的解，线性稳定性分析是研究非线性系统稳定性的基本技术之一，等等。此外，非线性问题的本质常常要在同线性关系的比较中才能深刻理解。

4.1 线性关系

线性与非线性原本是一对数学概念，用以区分不同变量之间两种基本的相互关系。常量之间无所谓线性与非线性之分。变量之间最简单最基本的关系是函数关系，即因变量对自变量的依存

关系。因变量与自变量成比例地变化，即变化过程中二者的比值不变，称为线性函数。否则，称为非线性函数。最简单的是一元线性函数，一般形式为

$$y = ax + b \quad (a \neq 0) \quad (4.1)$$

作为例子，弹簧长度 L 与拉力 F 的关系被表述为以下线性关系

$$L = kF + L_0 \quad (4.2)$$

k 为弹性系数， L_0 为 $F=0$ 时的弹簧初始长度。

(4.1) 中参量 a 具有实质意义，不同 a 值代表因变量与自变量的不同比率。如不同质的弹簧有不同弹性系数 k 。常数 b 没有实质意义，可以通过坐标变换 [令 $x_1 = x + b/a$ 代入 (4.1)] 而消去。因此，我们只需讨论如下形式的一元函数

$$y = ax \quad (4.3)$$

在几何学中，线性函数由平面直线或直线段表示，如图 (4.1) 所示：

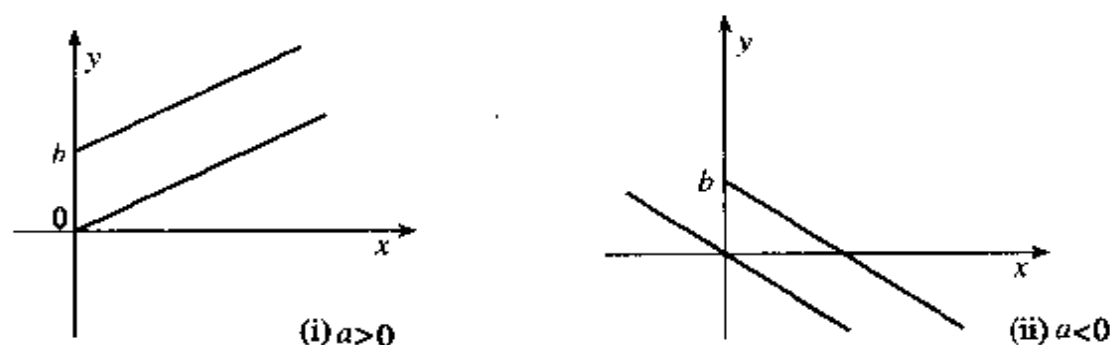


图 4.1

较为复杂的变量关系须用多元函数表示。(4.4) 为二元线性函数

$$z = ax + by \quad (4.4)$$

几何上代表 3 维空间的一张平面。

函数描述一个变量对另一个变量的依存关系，不是几个变量相互影响、相互依存的关系。描述变量之间相互依存关系的主要

数学形式是各种方程。(4.5) 是三个变量 x_1, x_2, x_3 之间的一种线性代数关系

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 &\leq b_2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

它表示变量 x_1, x_2, x_3 只能在给定的两个代数关系内变化, 每个变量的变化都影响另两个的变化。

函数和代数方程描述的是变量之间的静态相互关系。动态过程中的诸变量的相互依存关系要丰富复杂得多, 数学表达式中将出现微分、差分、积分等描述动态特性的项, 反映这些动态量对各个变量的依存关系。设某动态过程有两个变量 x 和 y , 均为时间的可微函数, 导数 $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ 和 $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$ 代表它们的变化速率。下述微分方程描述的是它们之间动态的线性相互关系

$$\begin{aligned} \dot{x} &= ax + by \\ \dot{y} &= px + qy \end{aligned} \quad (4.6)$$

$\frac{dx}{dt}$ 同时取决于 x 和 y , $\frac{dy}{dt}$ 同时取决于 y 和 x , 反映 x 与 y 相互的动态作用。

一般地说, 令 f 代表某种数学操作, 如关系、变换、运算、方程或其他, x 为数学操作的对象, $f(x)$ 表示对 x 施行操作 f 。若 $f(x)$ 满足以下两个条件

(1) 加和性

$$f(x_1 + x_2) = f(x_1) + f(x_2) \quad (4.7)$$

(2) 齐次性

$$f(kx) = kf(x) \quad (4.8)$$

合并表示为

$$f(ax_1 + bx_2) = af(x_1) + bf(x_2) \quad (4.9)$$

就称操作 f 为线性的。这是数学操作具有线性特性的基本要求,

称为叠加原理。

线性和非线性还可以区分两种不同的序关系。一个序列中的事物如果前后顺序衔接，一个接着一个排成一条长链，就是线性序，如图 4.2 (a) 所示。否则，如果序列中存在分支、闭合环路或其他复杂情形，如图 4.2 (b) 和 4.2 (c) 所示，称为非线性序。

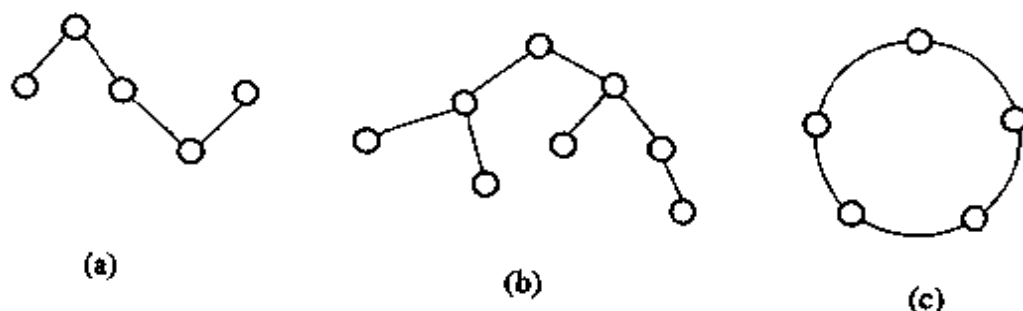


图 4.2

当实际问题被表示为数学形式、特别是解析形式时，线性与非线性的区别显而易见：只包含变量的一次项的是线性特性，其余均为非线性特性。没有给出数学表达式的实际现象，往往可以作直观的判断。一个事物的运行过程如果没有曲折、弯路、反复、振荡、间断、跳跃等现象，而是均匀展开、单向直进、一往无前，便可看作线性的。俗话所谓“水涨船高”，“道高一尺，魔高一丈”，“一分努力，一分成果”，说的都是线性关系。

4.2 线性系统

能够用线性数学模型（线性的代数方程、微分方程、差分方程等）描述的系统，称为线性系统。这类系统的基本特性，即输出响应特性、状态响应特性、状态转移特性等，都是线性特性，满足叠加原理的两个要求。(4.5) 描述的是线性静态系统，(4.6) 描述的是线性动态系统。

上述对线性系统的基本限制是一种理论假设，叫做线性假设。

真实系统或多或少都具有非线性特性，严格意义上的线性系统并不存在。但在许多情形下，实际系统的非线性很弱，把它忽略掉对于描述系统行为不会造成明显影响，至少所造成的失真处于允许范围内。这时就可以从线性假设出发，建立系统的数学模型。许多系统的非线性特性明显，只能建立非线性模型。但如果这种模型满足某些数学条件（如连续性、光滑性），可以通过对模型的线性化处理，以线性模型近似描述系统。如图 4.3 所示，曲线 $f(x)$ 在 x_0 附近可以用直线作很好的近似表示， x 的变化范围越小，近似描述的效果越好。这是线性系统的两个基本来源。由于线性系统在数学处理上十分简便，只要有可能，人们总是用线性系统来处理问题。这是线性理论获得广泛应用的实际背景。这种做法在实际生活中经常可见。例如，用直线型铁轨铺设弯曲的铁路。



图 4.3

一个系统能否使用线性模型，没有普适的判据。除取决于系统本身非线性特性的强弱外，还与实际应用场合对允许误差的要求有关。一个对象，有时可以作为线性系统，有时不允许用线性模型，需根据具体情况作具体决断。

以系统为对象，可以充分揭示叠加原理的内涵。我们以输出对输入的响应特性为例来说明。令 u_1 和 u_2 代表两个不同输入， y_1 、 y_2 代表相应的输出， $u = u_1 + u_2$ 代表同时输入 u_1 和 u_2 ， y 代表系统对 u 的输出响应。如果系统是线性的，即满足叠加原理，则有

$$y = y_1 + y_2 \quad (4.10)$$

此特性可以直观地表示为

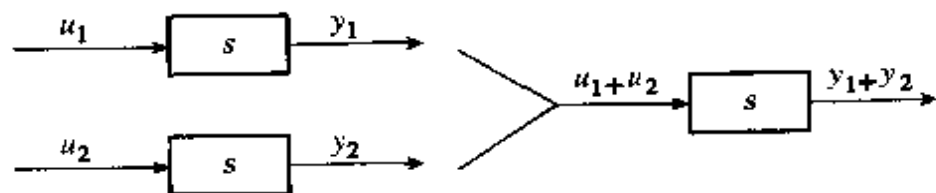


图 4.4

加和性的意义是，线性关系表示互不相干的独立作用。把 u_1 和 u_2 同时作用于系统，等于它们分别作用于系统之和，不会因 u_1 和 u_2 同时输入的相互影响而产生相干（联合）效应，即不会在 $y_1 + y_2$ 之外有所增益或亏损。

在社会系统中，人们不断采用各种举措或政策，以期获得相应的结果或效益。如果两个或多个举措同时实施所获效益等于各个举措分别实施所获效益之和，不因这些举措同时实行的相互影响而产生相干效应，就表示该系统具有加和性。

齐次性不是加和性的简单扩展，它有自己的特殊含义。齐次性意味着如果在系统中将输入倍化，输出也将同样倍化，不会发生定性的、结构性的改变。例如，在输出响应 (4.3) 中，令输入 u 是 t 的频率为 ω 的周期函数

$$u = \cos \omega t \quad (4.11)$$

则输出也是频率为 ω 的周期函数

$$y = a \cos \omega t \quad (4.12)$$

除振幅扩大 a 倍，系统不会出现差频或和频或倍频等现象。频率结构保持不变，是线性系统的重要特性。下章将看到，对于非线性系统，改变频率结构的现象是不可避免的。

满足叠加原理是线性系统的基本判据。有了数学模型，可直接按模型判别。没有数学模型时，可以用实验手段进行判别。给系统以不同输入，分别测得系统的输出，比较输入数据与输出数据即可判断系统是否满足叠加原理。

加和性可以推广到多个输入 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 的情形。需要指出，叠加原理通常只适用于有限项之和，未作附加假设，不可把它推广到无限和的情形。

线性叠加原理与第二章讲的整体突现原理是两种正相反对的断语。规定满足叠加原理为线性系统的基本特性，似乎将导出一个结论：线性系统不具备整体突现性，因而或者说整体突现性不是系统的普遍原理，或者说线性系统其实不是系统。这是一种误解。如前所说，线性系统是一种数学抽象，是忽略了系统固有的非线性因素的结果，非线性效应就是整体突现性。即使对于这类系统，允许忽略的只是系统定量特性（响应特性）中的非叠加性，系统功能这种定性性质方面的非叠加效应是不可忽略的。即使线性系统，整体功能也不能归结为部分功能之和，二者一般没有可比性，部分或部分简单相加不具备与整体可作数量比较的功能。有些系统的整体功能与部分的功能是同质的，可作数量比较，但也不等于部分之和，如 (2.1) — (2.3) 所示。不同系统的整体突现性一般在质和量两方面都有表现；线性模型描述的是那些只有平庸的低水平的突现性的系统，部分之间相互作用的相干效应在定量方面的表现微弱，因而可以忽略。但系统功能等定性性质的突现性是不可忽略的。

4.3 线性系统的动态行为描述

连续线性系统的动力学方程有如下一般形式

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= a_{n1}x_1 + \dots + a_{nn}x_n \end{aligned} \quad (4.13)$$

将系数用矩阵表示为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

相应的向量方程为

$$\dot{X} = AX \quad (4.15)$$

对于变系数系统，方程的系数为 t 的函数 $a_{ij}(t)$ ，系数矩阵记为 $A(t)$ 。我们只讨论常系数系统，并限定 A 为非奇异矩阵，即其行列式满足

$$\det A \text{ (或 } |A|) \neq 0 \quad (4.16)$$

最简单的是一维系统

$$\dot{x} = ax \quad (4.17)$$

通解为

$$x(t) = ce^{at} \quad (4.18)$$

c 为积分常数，由初值确定。设初值为 x_0 ，则特解为

$$x(t) = x_0 e^{at} \quad (4.19)$$

a 为特征指数，它的正负将给出两种完全不同的系统行为，如图 4.5 所示。 $a > 0$ 时系统发散， $a < 0$ 时系统收敛于特解 $x=0$ 。

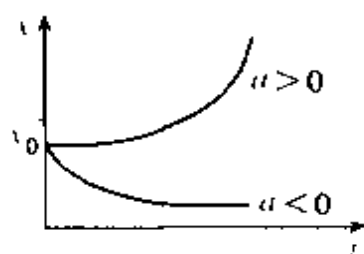


图 4.5

我们以二维系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a_{11}x + a_{12}y \\ \dot{y} &= a_{21}x + a_{22}y \end{aligned} \quad (4.20)$$

为典型例子，讨论线性系统的动态行为。它的系数矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

有关系统行为特性的全部信息，都隐含于它的动力学方程和系数矩阵中。矩阵是描述对象整体特性的数学工具之一。方程给定后，

借助代数方法,通过分析系数矩阵,可全面了解系统的动态行为。

我们寻找方程 (4.20) 如下形式的解

$$\begin{aligned}x(t) &= x^* e^{\lambda t} \\ y(t) &= y^* e^{\lambda t}\end{aligned}\quad (4.22)$$

以 V 记待定向量

$$V = \begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

λ 是生长率,亦为待定数。(4.22) 的向量形式为

$$X(t) = e^{\lambda t} V \quad (4.24)$$

将 (4.22) 代入 (4.20) 并消去 $e^{\lambda t}$, 得

$$AV = \lambda V \quad (4.25)$$

或

$$(A - \lambda I)V = 0 \quad (0 \text{ 矩阵}) \quad (4.26)$$

I 为单位矩阵。当 $V \neq 0$ 时有

$$A - \lambda I = 0 \quad (0 \text{ 矩阵}) \quad (4.27)$$

这是 λ 与 v 必须且只须满足的条件。相应的行列式方程为

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (4.28)$$

即

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (4.29)$$

这是系统 (4.20) 的特征方程,它的根 λ 称为特征值,与特征值 λ 对应的向量 V 称为 (4.20) 或矩阵 A 的特征向量。将特征方程 (4.29) 展开得

$$\lambda^2 - \tau\lambda + \nabla = 0 \quad (4.30)$$

其中

$$\tau = a_{11} + a_{22} \quad (4.31)$$

$$\nabla = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \quad (4.32)$$

解特征方程得特征根

$$\lambda_{1,2} = \frac{\tau \pm \sqrt{\tau^2 - 4\Delta}}{2} \quad (4.33)$$

令 V_1 、 V_2 分别记对应于两个特征根的特征向量，二者线性无关，由它们可张成状态空间。任一初态 X_0 均可表示为

$$X_0 = C_1 V_1 + C_2 V_2 \quad (4.34)$$

根据叠加原理，(4.20) 的所有时间轨道有如下形式

$$X(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} V_1 + C_2 e^{\lambda_2 t} V_2 \quad (4.35)$$

例 求系统

$$\begin{aligned}\dot{x} &= x - 2y \\ \dot{y} &= -6x + 2y\end{aligned}$$

在初值为 (0, 1) 时的通解。

解 系统的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -2 \\ -6 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

计算得 $\tau = 3$ ， $\Delta = -10$ ，特征方程为 $\lambda^2 - 3\lambda - 10 = 0$ ，特征根为 $\lambda_1 = -2$ ， $\lambda_2 = 5$ 。设特征向量为 $V = (v_1, v_2)$ ，满足

$$\begin{bmatrix} 1 - \lambda & -2 \\ -6 & 2 - \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

对于 $\lambda_1 = -2$ ， $v_1 = \frac{2}{3}v_2$ 。取平凡解 $(v_1, v_2) = (2, 3)$ 。对于 $\lambda_2 = 5$ ， $v_1 = \frac{1}{2}v_2$ ，取平凡解 $(v_1, v_2) = (1, 2)$ 。因而得特征向量

$$V_1 = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix} \quad V_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

通解为

$$X(t) = C_1 \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix} e^{-2t} + C_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} e^{5t}$$

取初值 $(0, 1)$, 有

$$0 = 2C_1 + C_2$$

$$1 = 3C_1 + 2C_2$$

得 $C_1 = 1$, $C_2 = -2$, 特解为

$$x(t) = 2e^{-2t} - 2e^{5t}$$

$$y(t) = 3e^{-2t} - 4e^{5t}$$

4.4 线性系统的相图

为把握动态特性, 需要进一步讨论特征值的结构和分布。 λ 可能是重根, $\lambda_1 = \lambda_2$; 一般情形下是单根, $\lambda_1 \neq \lambda_2$ 。特征值 λ 一般为复数, 以 R 记实部, I 记虚部, 则

$$\lambda = R + iI \quad (4.36)$$

$I=0$ 为一对实根, 或为单根, 或为重根。 $R=0$ 为一对虚根, 亦有单根与重根之分。一般情形下, R 与 I 均不为 0, 是一对共轭复根。 λ 的各种可能取值及分布如图 4.6 所示, 其中小坐标系 $R-I$ 为复平面, 示意特征值的分布。

不难证明, 线性系统只有不动点型定态, 没有极限环和环面, 更没有以分形表示的复杂定态。但各种类型的不动点都可能存在。(4.20) 有且只有一个定态 $X(t)=0$, 与控制参量的变化无关。(4.20) 有 4 个控制参量 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 和 a_{22} 。上节给出的 τ 和 ∇ 是控制参量的函数, 可看作广义的控制参量。特征值的分析表明, 系统的动态特性完全由这两个量决定。图 4.6 表明, 在以 τ 和 ∇ 为坐标的广义控制平面上, 可以把特征值按不同结构清楚地划分为几个区域。图 4.7 在同一平面上把线性系统所有不动点的类型和分

布一目了然地表示出来。

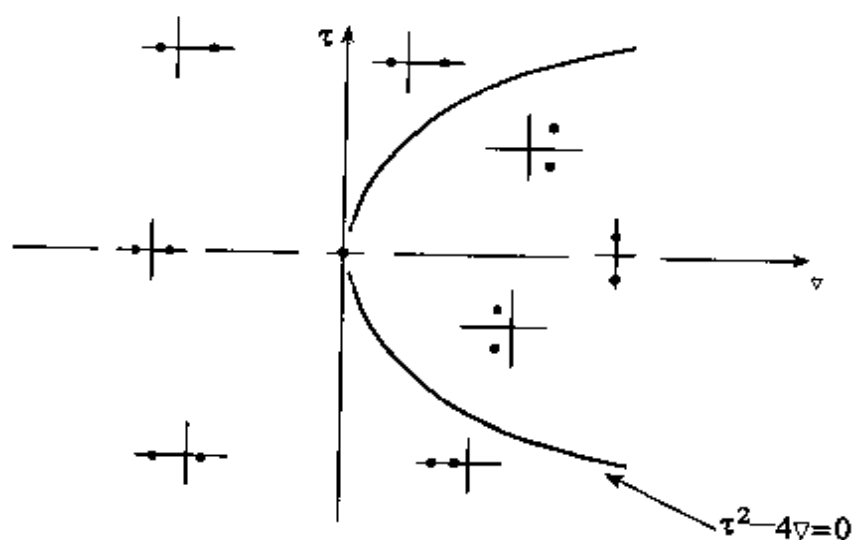


图 4.6

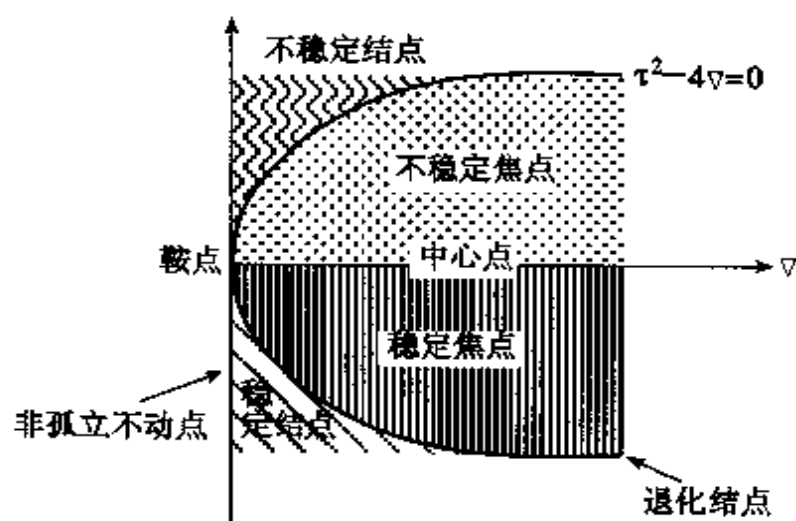


图 4.7

线性系统定态点的主要类型是鞍点、结点和焦点，分以下几种情形讨论。

(1) $\nabla < 0$ ，即在左半平面， λ 为实数，且一正一负，不动点是鞍点；

(2) $\nabla > 0$ ， $\tau^2 - \nabla < 0$ ，即在曲线围成的区域内， λ 为一对共

纯复数，不动点为焦点，上面是不稳定的，下面是稳定的；

(3) $\nabla > 0$, $\tau^2 - 4\nabla > 0$, 即在曲线与 τ 轴之间的区域，不动点是结点，上面是不稳定的，下面是稳定的。

图 4.7 中三条分界线值得注意。 ∇ 轴的右半轴为中心点，是稳定焦点与不稳定焦点的分界线。曲线

$$\tau^2 - 4\nabla = 0 \quad (4.37)$$

为焦点与结点的分界线，对应的特征根为一对重实根，代表退化结点，焦点与结点通过这种点而相互过渡。 τ 轴由非孤立不动点组成。三条分界线中，最重要的是中心点组成的线，它们代表一类稳定定态。

以上是就二维系统得出的结果，但原则上也适应于任何维线性系统。需要强调指出，特征值实部的符号有重要的动力学意义。实部为正的特征根的数目，叫做系统的指标，记作 index 。一般讲， $\text{index} = 0$ 的定态为吸引子， $\text{index} = n$ (相空间维数) 的定态为排斥子， index 介于 0 与 n 之间的定态是鞍点。可见，存在不同指标的鞍点，它们在动力学特性方面有性质上的不同。二维空间施展不开，三维空间可充分看到这一点，如图 4.8 (见下页) 所示。

4.5 线性系统的平庸行为

线性系统的轨道稳定性完全取决于控制参量或特征值，与初态无关。如系统 (4.17)，若 $a > 0$ ，不论从什么初态出发，轨道都向无穷发散，是不稳定的；若 $a < 0$ ，不论从什么初态出发，轨道都收敛于平衡态 $x(t) = 0$ ，是稳定的。只要判明一条轨道稳定或不稳定，即可断定所有轨道稳定或不稳定。唯一例外是存在鞍点时，有一个特征方向上存在稳定轨道，而其他所有轨道都是不稳定的。但与布满相空间的无穷多条不稳定轨道相比，个别稳定轨道的存在不能改变整个系统不稳定的结论。这种划一性是线性系统的重

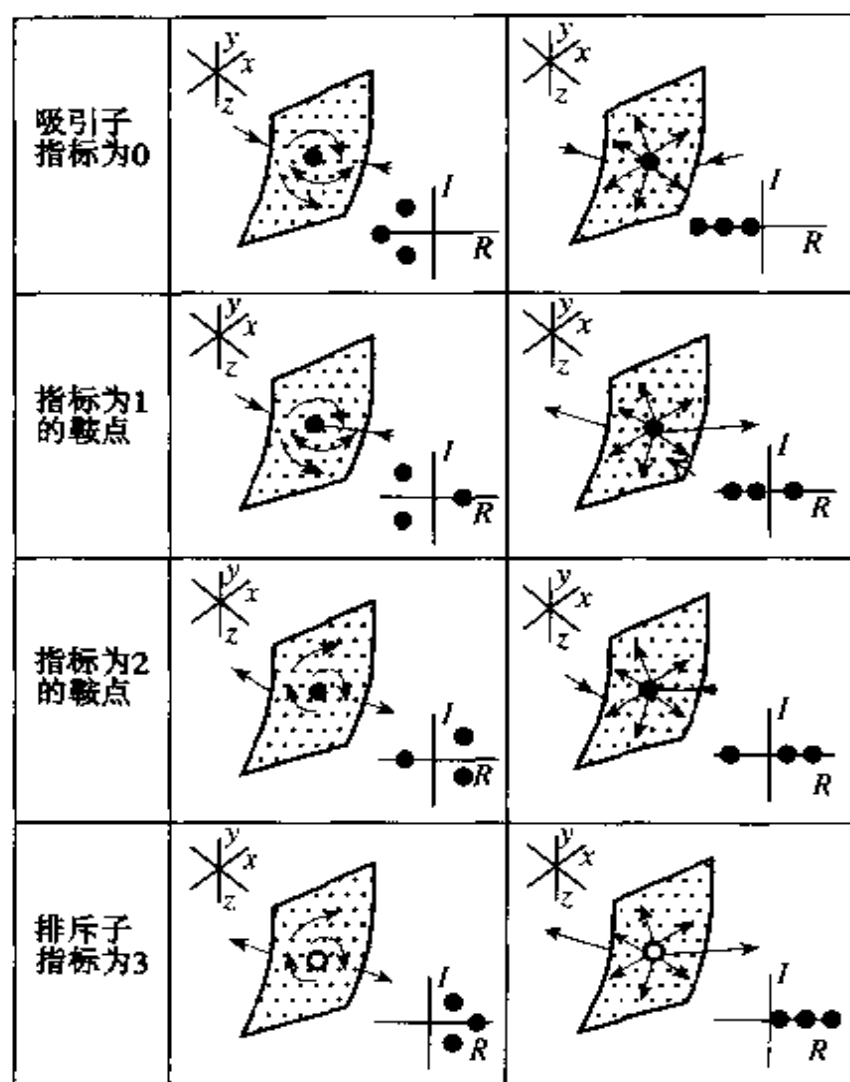


图 4.8

要特征。因而可以说一个线性系统是否稳定，而不只讲某条轨道是否稳定。

线性系统不存在极限环，表明它不可能自发产生周期运动，即所谓自激振荡。线性系统只有当外部输入周期性强迫作用时，才会产生周期运动。更不可能产生较周期运动复杂的定态行为，因为线性系统只可能存在不动点型的定态。定态类型的这种单纯性，决定了系统行为的单纯性、平庸性。

线性系统可能没有吸引子,如(4.17)中 $a > 0$ 的情形;至多存在一个吸引子,或为稳定结点,或为稳定焦点。由于不可能同时存在多个吸引子,相空间不会划分为几个吸引域。只要有吸引子,整个相空间都是它的吸引域,定态对相空间所有轨道都有吸引作用。

由图 4.7 可以看出,线性系统只有不动点型定态,至多只有一个定态,只可能出现从一个不动点向另一个不动点的转变,不可能出现从不动点向极限环或更复杂的定态转变,不可能发生原吸引子失稳后出现新的吸引子。随着控制参量的变化,可能出现不动点的创生或消灭,或稳定性的改变。如(4.17),当 a 由正向负变化时,在0点发生结点从不稳定向稳定的改变,当反向变化时,在0点发生结点从稳定向不稳定的改变,即稳定性的交换。在这种意义上说,线性系统也存在分叉和突变,但只是平庸的分叉和突变。从严格的意义看,线性系统不存在分叉与突变这种非平庸行为。

思 考 题

1. 什么是线性假设? 什么叫线性系统?
2. 试述线性化处理的客观依据。
3. 概述线性科学处理非线性问题的基本方法。
4. 为什么说 400 年来的科学主要是线性科学?

阅 读 书 目

1. S. H. Strogatz; Nonlinear dynamics and chaos; with applications to physics, biology, chemistry and engineering, chapter 5.
2. J. M. T. Thompson, H. B. Stenmit; Nonlinear Dynamics

and Chaos: Geometrical Methods for Engineers and Scientists,
Chapter 3.

第 5 章 非线性系统理论

5.1 非线性特性

线性特性本质上只有一种，不同线性函数（直线）只是比例系数不同，没有定性性质的差别，经过简单的数学变换（平移和旋转），可以完全重合。非线性特性有无穷多种可能形态。仅就一元函数看，它的一般形式为

$$y=f(\lambda, x) \quad (5.1)$$

λ 为参数。 f 有无穷多种形式，如抛物线函数 $y=3x^2$ ，指数函数 $y=5^x$ ，正弦函数 $y=\sin x$ 等。它们之间有定性性质的不同，不可能由一种或几种简单形式经过某些数学变换产生出来。正是非线性的这种特点，产生了现实世界的无限多样性、丰富性、复杂性。

我们就非线性函数关系的下列几种简单而典型的情形，说明非线性的若干特征和来源，以便获得对于非线性的直观理解。

(1) 变比特性 两个变量不按固定的比率变化。如图 5.1 所示，对于 $x_1 \neq x_2$ ，一般地有

$$\frac{y_1}{x_1} \neq \frac{y_2}{x_2}$$

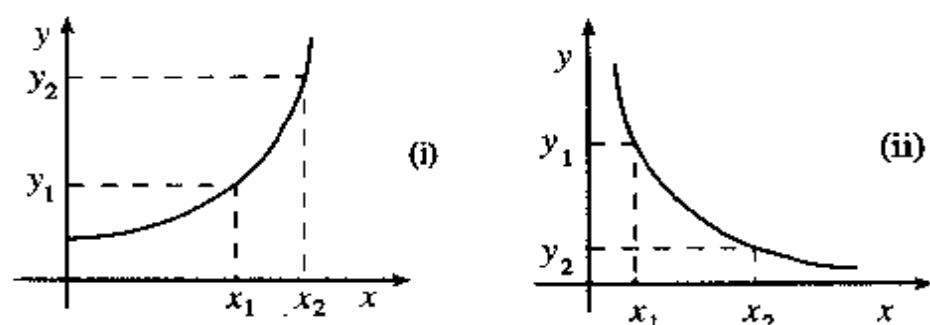


图 5.1

变比特性是广泛存在的非线性现象。例如，实际弹簧系统都具有变比特性，长度 L 是作用力 F 的非线性函数，不同长度时的弹性系数 k 取不同值。一般来说，一种事物的增长（经济增长、身高增长等）均非固定比例，而是变比例的。仅仅比例变化是最简单的非线性现象，线性特性可以看作比例变化逐步趋缓的极限情形。在图 5.1 中，随着 x 的增长， y 的变化 (i) 为单调上升，(ii) 为单调下降，在变化的单调性上，与线性特性一致。

(2) 饱和特性 如果单调递增或递减的函数在一定阶段后逐步趋向于或保持在某一常数值，如图 5.2 所示，称为饱和特性。

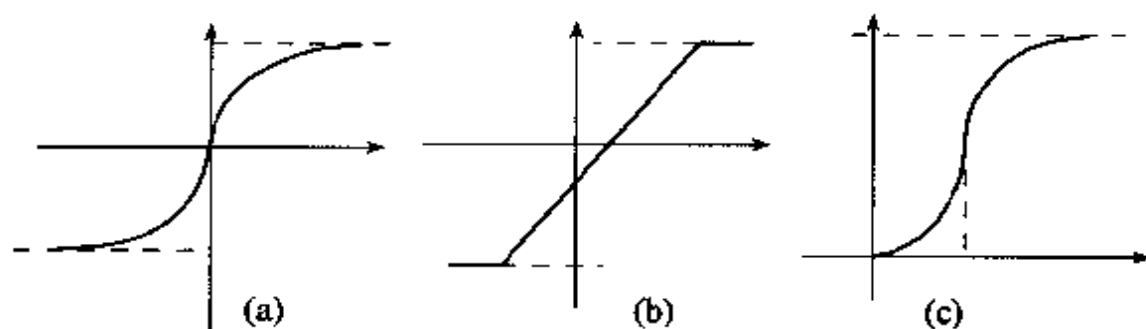


图 5.2

左图为一般情形，中图为用线性关系近似表示的饱和特性，右图为逻辑斯蒂曲线，特点是在拐点之前函数 y 加速上升，在拐点之后转为减速上升，逐步逼近虚线。这也是一种广泛存在的非线性

现象，在许多事物的生长发育中可以看到。饱和特性反映的仍是单调变化，但与图 5.1 比具有更强的非线性因素。

(3) 非单调性 单调变化与线性关系有较多的共性，非单调的函数关系表现出更强的非线性。图 5.3 给出几个非单调变化的函数关系。

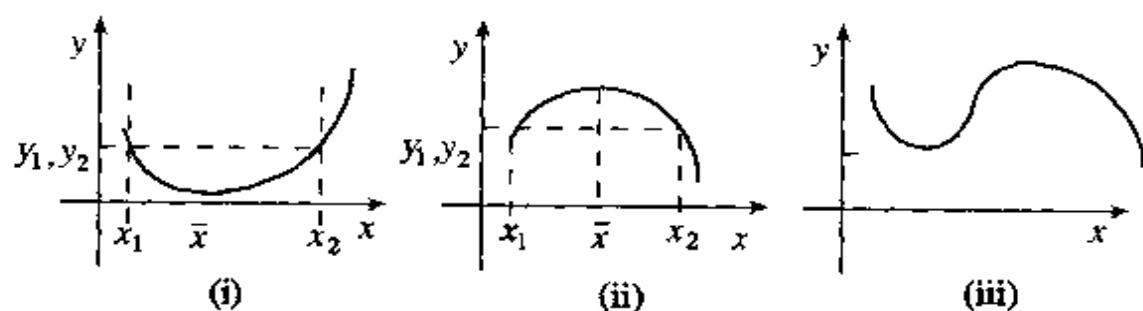


图 5.3

(i) 与 (ii) 代表抛物线函数

$$y = ax^2 + bx + c \quad (5.2)$$

其中，具有实质意义的是系数 a 。经适当变换可写作

$$y = kx^2 \quad (5.3)$$

(i) 与 (ii) 中可看到“过犹不及”的非线性现象， $x_1 \leq \bar{x} \leq x_2$ ，但 $y_1 = y_2 \neq \bar{y}$ 。(iii) 是前二者的合成，反映了“一波三折”的非线性现象。

(4) 振荡特性 非线性更强的系统可能表现出图 5.4 所示振荡特性，左图为不规则的振荡，右图为正弦波动。在实际过程中看到的各种曲折、起伏、波浪运动等，都是振荡特性。

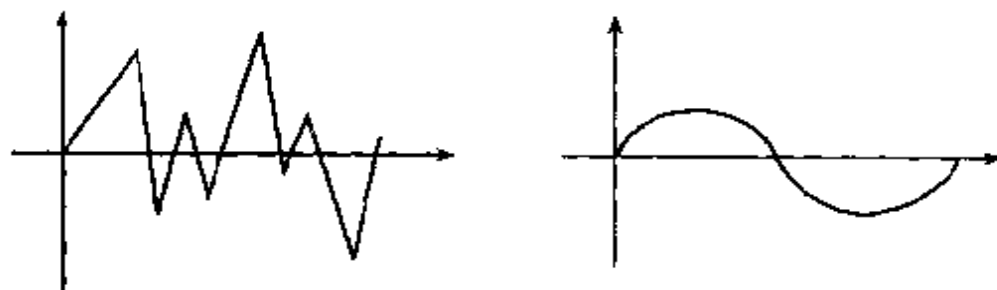


图 5.4

(5) 多值响应特性 前四种情形的共同点是一因一果，一个输入得到一个输出，数学上的表现是用单值函数描述。它们代表完全确定论的描述方法，也可称为单线论。但大量的情形表现为一因多果的非线性现象，在同一输入作用下，系统以不同的输出去响应，表现出不确定性。在数学上，这种特性用多值函数描述，可称为多线论。如图 5.5 所示，(i) 为典型的一元多线，(ii) 为通常的多值函数。

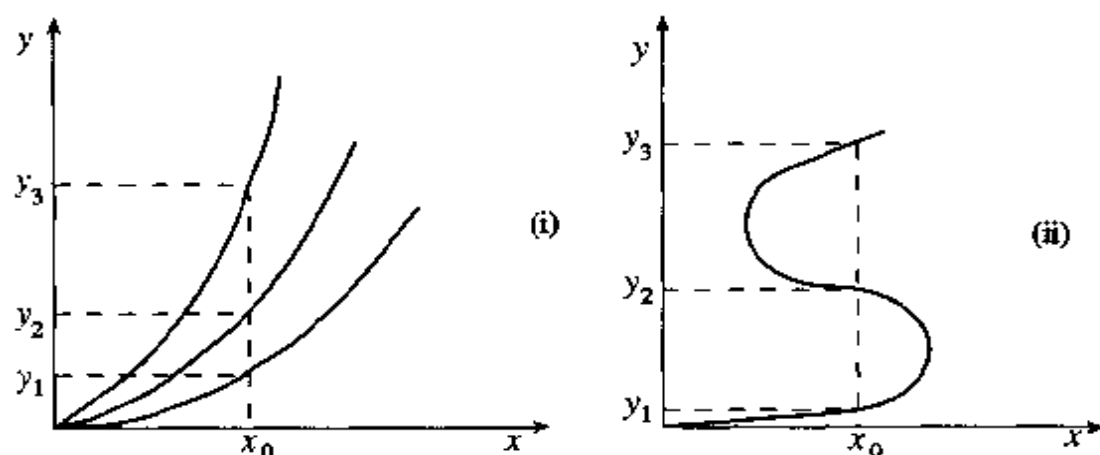


图 5.5

(6) 循环特性 事物周而复始的运动也是普遍存在的非线性现象，数学上用闭合曲线表示，如图 5.6 所示。这是一类特殊的多值特性。

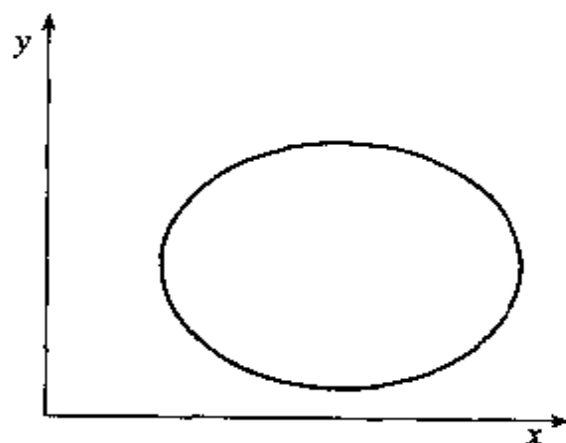


图 5.6

(7) 间断（跳跃）特性 在自变量的某些点上，函数发生不连续的变化，即跳跃，称为间断特性，如图 5.7 所示。这是一类极为强烈的非线性，即使如左图那样，间断点前后均为线性关系，由于存在间断，整体上仍显示强烈的非线性。

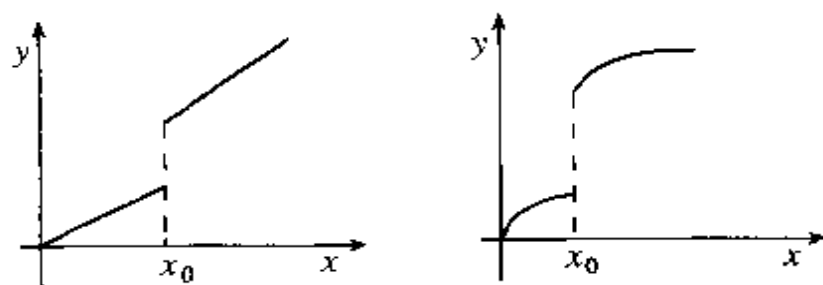


图 5.7

(8) 失灵特性 在自变量 x 的一定范围内函数 y 的值均为 0，超过这个范围后 y 才取非 0 值，这种非线性称为失灵特性。 y 取 0 值的 x 变化范围，称为系统的失灵区，又称死区。在死区内，有输入而无输出，只有输入足够强（超过死区）时才有非 0 的输出响应。这也是一种强烈的非线性。例如，出台一项政策，若力度不够，便没有效果，只有当力度达到一定值时，才能引起期望的社会效果。图 5.8 描绘了这种特性。左图为一般情形， $[a, b]$ 为死区。右图为一种特殊情形，即继电器特性，是失灵特性与跳跃特性的合成效果。

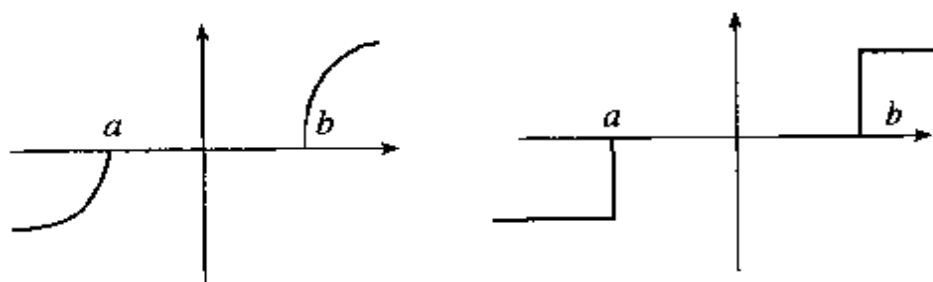


图 5.8

(9) 折叠特性 一个连续的过程在某处突然改变方向，甚至发生 180° 的大转弯，这在实际生活中是常见的。用数学语言描述，

就是函数连续而它的导数发生不连续的改变。这种非线性现象称为折叠特性，可能产生更深刻的系统性态和奇异行为。图 5.9 描绘了它的简单情形。如右图所示，即使折叠前后都是线性关系，在整体上也是强烈的非线性。

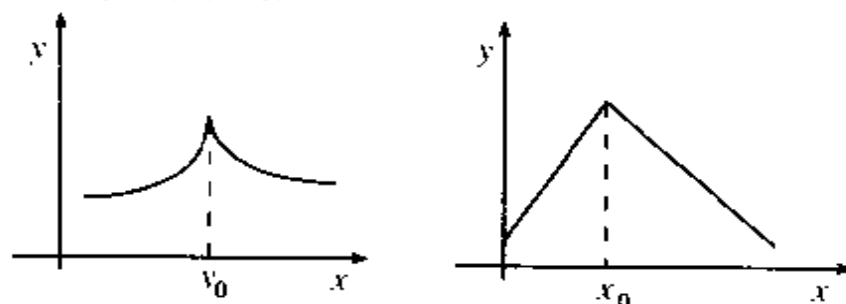


图 5.9

(10) 滞后特性 图 3.23 所示的滞后特性也是一种重要的非线性现象，可能给系统带来某些不寻常的性态和行为。

多个变量的非线性相互作用，一般用非线性方程描述，包括非线性的代数方程、差分方程、微分方程等。

5.2 非线性系统

用非线性数学模型描述的系统，称为非线性系统。其基本特征是不满足叠加原理，即系统的输出响应特性、状态响应特性、状态转移特性中至少有一个不满足叠加原理。建立起数学模型后，只要其中有一个非线性项，就是非线性系统，也可以用实验方法检验系统是否满足叠加原理。更一般地说，一个系统若不能用线性模型描述，不论是否给出数学模型，实质上都是非线性系统。

为说明这一点，我们考察以下抛物线函数描述的输出响应特性

$$y = au^2 \quad (5.4)$$

令输入 u_1 和 u_2 对应的输出响应分别为 y_1 和 y_2 ，则输入 $u = u_1 + u_2$ 对应的输出响应为

$$y = y_1 + y_2 + 2au_1u_2 \quad (5.5)$$

$y \neq y_1 + y_2$, 不满足叠加原理, 因为增加了非 0 项 $2au_1u_2$, 即系统自身的非线性效应。

设系统为动态的, 输出 y 与输入 u 均为时间 t 的函数。令输入是频率为 ω 的周期函数

$$u = \cos t \quad (5.6)$$

由三角学可知输出响应为

$$y = a[\cos \omega t]^2 = \frac{a}{2} + \frac{a}{2} \cos(2\omega t) \quad (5.7)$$

输出中出现非周期项 $a/2$ 和倍周期项 $\cos 2\omega t$, 频率成分不同于输入, 不满足叠加原理的齐次性要求。这种定性性质的改变, 是系统的非线性特性造成的, 与线性系统有定性性质的不同。

非线性效应不仅可以导致零频和倍频现象。如果输入作用中包含两个频率 ω_1 和 ω_2 , 由于非线性效应, 输出频率中除有 0 频和倍频 $2\omega_1$ 、 $2\omega_2$ 外, 还有差频 $\omega_1 - \omega_2$ 与和频 $\omega_1 + \omega_2$, 甚至出现复合频率 $n\omega_1 - m\omega_2$ (n 、 m 为整数)。不难证明, 只要系统是非线性的, 都会出现和频、差频和倍频, 频率结构有多种可能的变化。非线性系统甚至可能出现分频现象, 即输出频率为 $\omega/2$ 、 $\omega/3$ 等, 法拉第 160 年前在物理实验中发现的这种奇异现象, 最近几十年才被科学界认识。所有这些现象在线性系统中是看不到的。

对于千差万别、形态各异的非线性现象, 可作如下粗略分类:

(1) 弱非线性和强非线性。强弱是相对的, 没有精确的分界线。如 x^2 的非线性强于 $\sqrt{x}$ 的非线性, 弱于 x^3 的非线性, 单调变化的非线性弱于非单调变化的非线性; 小范围看是弱非线性, 大范围看往往是强非线性。粗略地说, 我们把可以忽略不计的非线性看作弱的, 把不可忽略的非线性看作强的。弱非线性可以看作是对线性关系的偏离, 允许忽略这种偏离, 采用线性假设, 用线性模型描述系统。

(2) 非本质非线性和本质非线性。如连续、光滑变化的非线性是非本质的，不连续、非光滑的非线性是本质的。本质非线性必定是强非线性，强非线性未必是本质非线性。

(3) 平庸非线性和非平庸非线性。能产生奇异行为的是非平庸非线性，否则为平庸非线性。

非线性系统也有静态和动态之分。本章只讨论动态非线性系统，且主要是连续的、集中参数的系统，有时还涉及差分方程描述的离散系统。

5.3 非线性系统的动态行为描述

连续非线性系统的动力学方程一般形式就是(3.8)，其中 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 中至少有一个是非线性函数，反映动态变量 $\dot{x}_1, \dots, \dot{x}_n$ 以非线性方式依赖于状态变量 $x_1, \dots, x_n$ 。与线性函数的单一形式不同，非线性函数有无穷多种不能互换的不同形式，代表无穷多种性质不同的系统特性，不可能用单一的或有限的几种方法解决非线性系统的一切问题。因此，一般地讨论方程(3.8)的求解问题是不可能的。非线性现象的这种多样性，正是现实世界无限多样性、丰富性和复杂性的根源。

最简单的是一维非线性系统，动力学方程的一般形式为

$$\dot{x} = f(x) \quad (5.8)$$

非线性函数 $f(x)$ 仍然有无穷多种不同形式，(5.8)代表无穷多种定性性质不同的系统。尽管(5.8)在相当宽的条件下存在唯一解，但一般地求解此方程仍不可能。只有当 $f(x)$ 为可积函数时，可用分离变量法求得解析解。普遍有效的办法是通过数值计算求近似解。

对于弱非线性系统，根据“非线性是对线性的偏离”的观点得到一种有效的处理方法。由微积分知，只要非线性函数 $f(x)$ 满

足连续性、光滑性要求，在局部范围内可用线性函数近似代表它。考察 (5.8) 在 x_0 附近的局部性质。按泰勒公式展开得

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \varphi(x) \quad (5.9)$$

$\varphi(x)$ 为高次项，即非线性余项。只要 $x - x_0$ 足够小，非线性项可以略去不计，得到它的线性近似表达。因而非线性系统 (5.8) 在 x_0 处的局部性质可用以下线性系统近似描述

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \\ &= ax^2 + b \end{aligned} \quad (5.10)$$

其中， $a = f'(x_0)$, $b = f(x_0) - x_0 f'(x_0)$ 。

我们就 $n=2$ 的情形讨论 (3.8)，即系统

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (5.11)$$

设 f_1, f_2 在 (x_{10}, x_{20}) 附近连续可微。将 (5.11) 展开为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \text{高次项} \\ &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \text{高次项} \end{aligned} \quad (5.12)$$

在 (x_{10}, x_{20}) 附近略去高次项，得到与 (4.20) 相同的线性方程，系数矩阵就是 (4.21)，可作为描述非线性系统 (5.11) 局部特性的线性模型。

在某一点附近把非线性模型展开，略去非线性项，化作线性模型，利用线性系统理论来分析模型，由此得到有关非线性系统局部行为的近似结论。只要系统满足连续性和光滑性要求，且限于考察局部行为，得到的结论就是可信的。这种方法叫做对非线性系统的局部线性化处理，是经典科学处理非线性问题的基本手段，有广泛的应用。

在维数取任何整数的一般情形下,只要非线性函数满足连续、光滑性要求,非线性系统(3.8)均可作线性化处理,得到相应的线性系统(4.13)。

在许多情形下,完全不考虑展开式中高次项的影响,仅仅用线性化方法得到的结论不能满足要求。经典科学的办法是在作线性化近似处理后,再把高次项作为扰动因素考虑进去,对结论加以修正。这叫做线性化加微扰方法,有重要的方法论意义,是经典科学对付非线性的主要手段。

但线性化加微扰的方法本质上不是非线性系统理论的方法,而是线性系统理论的方法。它只限于处理非本质的非线性问题,不能用于处理有间断点、不光滑点的非线性问题。即使非本质的非线性,也只适用于分析局部特性,不能用于大范围问题。系统观点和方法的优点是处理大范围的、全局的问题,线性化处理不能真正体现这种优点。事实上,在系统科学诞生以前很久,就发明了线性化方法。线性化处理的要害是忽略非线性因素,而非线性因素正是系统产生多样性、奇异性、复杂性的根源,线性化处理恰好化掉了这个根源,因而不是处理非线性问题的根本方法。

非线性系统理论研究的基本对象是不能线性化的问题,即系统在大范围内的行为,特别是本质非线性现象。第3章介绍的方法主要是为处理这类问题而准备的。

5.4 非线性系统的稳定性

考虑一维系统

$$\dot{x} = \sin x \quad (5.13)$$

不动点方程为

$$\sin x = 0 \quad (5.14)$$

它有无穷多个不动点，对任何整数 k ， $x=k\pi$ 均为不动点，如图 5.10 所示。其中，凡 $x=(2k+1)\pi$ 的点代表稳定平衡态， $x=2k\pi$ 的点为不稳定平衡态。如果考虑控制参量的影响，即演化方程

$$\dot{x} = \sin ax \quad (5.14)$$

a 的改变将使系统的稳定性有新的变化。

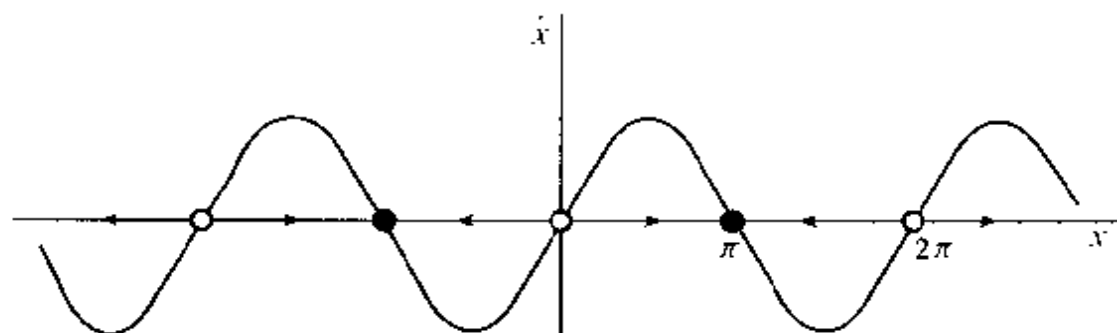


图 5.10

这个例子表明，与线性系统不同，非线性系统的基本特征是轨道稳定性的非划一性，除少数情形外，一般非线性系统同时存在稳定轨道与不稳定轨道，判明某些轨道稳定与否，不能把结论推广到其他轨道。线性系统可以谈论系统是否稳定，在非线性情形的下，一般地谈系统稳定性是没有意义的，只能谈某条轨道（解）的稳定性。

非线性系统稳定性的判别方法 现在最常用的是李亚普诺夫给出的两个方法。所谓李亚普诺夫第一方法，又叫做线性近似法，是把非线性系统作线性化处理，判别所得线性系统的稳定性。由于稳定与否一般是系统的局部特性，这种判别法是有效的。只要变量变化足够小，非线性系统 (3.8) 的展开式中线性部分 (4.13) 的稳定性足以代表非线性系统的稳定性。这种分析技术被称为线性稳定性分析，在动态系统理论中有非常重要的应用。

由微分方程论知， n 维线性系统 (4.13) 的通解为

$$x(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + \cdots + c_n e^{\lambda_n t} \quad (5.15)$$

c_i 为积分常数, 由初始条件决定。 $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为特征指数。(5.15) 表明, 线性系统的稳定性由特征指数 λ 决定, λ 由方程的系数 (控制参量) 决定。这里有三种情形:

1) 当所有 λ 的实部 R 为负数时, 轨道 $x(t)$ 是渐近稳定的;

2) 当 λ 的实部 R 中至少有一个为正数时, 轨道 $x(t)$ 是不稳定的;

3) 当 λ 的实部 R 均非正数、但至少有一个为 0 时, 轨道 $x(t)$ 可能稳定, 也可能不稳定。这种情形叫做临界稳定性, 须用更精致的判据来分析。

考察一维系统

$$\dot{x} = ax + bx^3 \quad (5.16)$$

显然, $x(t) \equiv 0$ 是一个定态解。我们讨论控制参量 a 对一般解 $x(t)$ 稳定性的影响。在初态 x_0 处给状态变量以小改变量 $u(t)$

$$x(t) = x_0 + u(t) \quad (5.17)$$

代入 (5.16), 略去非线性项, 得到对应的线性方程

$$\dot{u} = au \quad (5.18)$$

它的解为

$$u(t) = u(0)e^{at} \quad (5.19)$$

解的稳定性分两种情形:

1) $a < 0, t \rightarrow \infty, e^{at} \rightarrow 0, u(t) \rightarrow 0, x(t) \rightarrow x_0$, 稳定;

2) $a > 0, t \rightarrow \infty, e^{at} \rightarrow \infty, u(t) \rightarrow \infty, x(t) \rightarrow \infty$, 不稳定。

$a = 0$ 为结构不稳定点, 跨越这一点, 系统发生稳定性的交换。

李亚普诺夫第二方法, 又称直接方法。思路是: 不从解方程入手, 而是研究方程的结构和参数, 构造所谓李亚普诺夫函数 $V(x)$, 按 $V(x)$ 性质可以对稳定性作出判断。直接方法的关键是构

造函数 $V(x)$ ，但至今尚无通用的构造方法。

5.5 非线性系统的相图

线性系统中发现的各类不动点，如中心点、结点、焦点、鞍点，在非线性系统中均可发现。在简单而非常广泛的情形下，通过线性化处理，可按对应的线性系统来确定非线性系统的不动点。如果系统的向量场从二次或高次项开始，线性化处理无济于事，须有更精致的方法。

与线性系统不同，对于一般非线性系统，线性化处理只能提供不动点附近轨道的信息，不能确定大范围的轨道特性。要获得非线性系统大范围的相图信息，须用所谓指标理论。指标理论提供的是一种拓扑方法，可以回答这样一些问题（就 2 维系统来讨论）：

是否一条闭合轨道必定包含一个不动点？如果是，可能有哪些类型的不动点？哪类不动点会在分叉时消失？如何确定相平面上某个指定部分不可能有闭合轨道？等等。

非线性系统的相图的一个显著特点是可能出现极限环或多维环面。图 5.11 给出一个包括多个定态的 2 维系统相图。 A 为稳定焦点， C 为不稳定结点， D 为稳定极限环， B 为鞍点。需要特别注意的是由鞍点 B 引出的轨道，称为鞍沿，把相平面划分为不同区域。鞍沿在相图中的作用如同地球表面上的分水岭，把相空间的流线划分为若干区域。在图 5.11 中，鞍沿与极限环一起把相平面划分为 5 个区域。确定了不动点、极限环和鞍沿，整个相平面的结构就清楚了。

2 维系统最复杂的行为是周期运动，相平面不会出现比极限环更复杂的相轨道。环面上的周期运动，其他更复杂的运动，要到 3 维以上的非线性系统中寻找。但高于 3 维的相图无法直观描述。

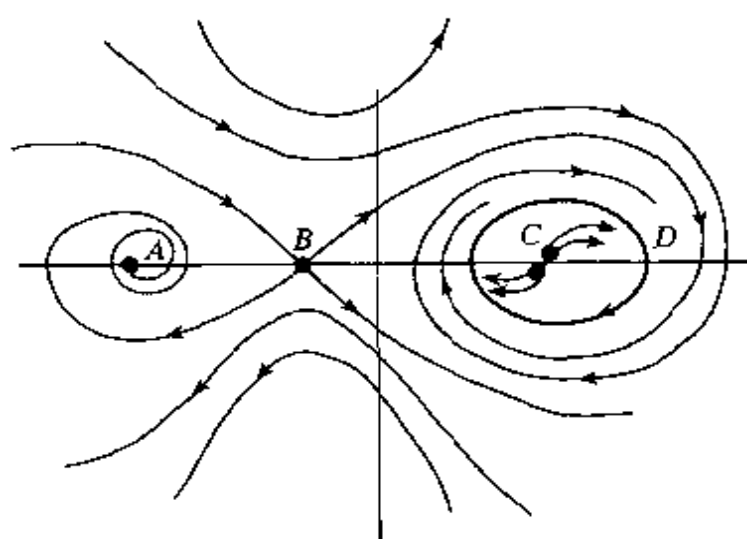


图 5.11

要了解相图的定量特性，须对运动方程作数值分析，可用所谓 Rung-Kutta 方法。

5.6 非线性系统的吸引子

与线性系统一样，非线性系统可能存在吸引子，也可能不存在吸引子。例如，当 $r > 0$ 时，系统 $\dot{x} = r + x^2$ 就没有吸引子。

线性系统只可能有点吸引子，即平衡运动。非线性系统可能有各种形式的吸引子，如点吸引子（稳定的结点和焦点），环吸引子（各种维数的稳定极限环、维数不小于 2 的各种稳定环面），奇怪吸引子（各种维数的稳定分形点集），“混沌边缘”，代表各种可能形式的非平衡运动。而且，由这种非平衡点吸引子代表的运动体制是非线性系统的基本运动体制。

如图 5.12 描述的系统，具有一个稳定极限环 D ，两个鞍点 A 和 C ，一个不稳定结点 B 。

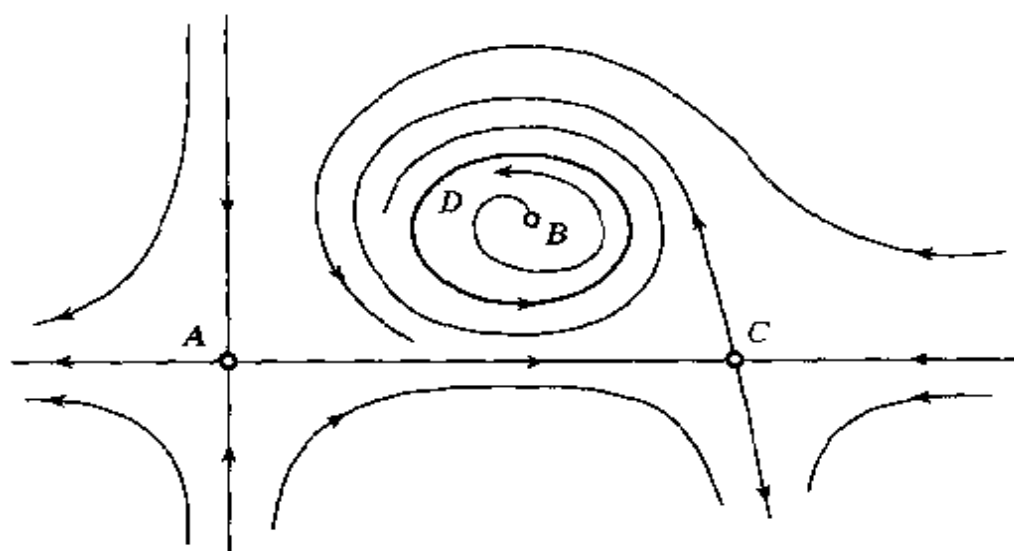


图 5.12

线性系统至多可能有一个吸引子。非线性系统可能同时存在几个吸引子。不同吸引子可能是同类的，也可能是不同类的。如图 5.11 描述的系统有两个吸引子，且为不同类型， A 为稳定焦点，代表稳定平衡运动； D 为稳定极限环，代表稳定周期运动。有些系统可能同时存在点吸引子和奇怪吸引子，或同时存在环吸引子和奇怪吸引子，或同时存在点吸引子、环吸引子和奇怪吸引子。更典型的例子可看图 9.19 所示杜芬方程的吸引子分布。原则上讲，不同吸引子的各种可能搭配都存在。多吸引子并存是非线性系统非常重要的基本特性。

若线性系统具有吸引子，必定以整个相空间为吸引域，吸引子刻划了系统在整个相空间的行为特征。这种情形在非线性的系统中一般不可能。当非线性系统同时存在多个吸引子时，相空间被划分为若干区域，每个吸引子只能刻划相空间中一部分即它所在的吸引域中的系统行为。在多个吸引子并存时，划分吸引域，确定分界线，对于描述非线性系统是非常重要的。

并存于同一相空间的几个吸引子之间必然相互竞争，使系统

演化具有多种可能前途。在多种可能前途中如何选择，对系统至关重要。线性系统只有一种前途，没有选择的余地。在多种可能前途中进行选择是非线性系统的另一重要特征。

综上所述，虽然吸引子理论在研究线性系统时也有用处，但只有在非线性系统中才获得真正的用武之地。有关吸引子的知识是非线性系统理论的基本组成部分。

5.7 非线性系统的自激振荡

工程实践和社会活动早已发现，即使没有周期性外作用力，非线性系统也可能自发产生周期性振荡。相空间方法揭示出这种现象的产生机制是系统存在极限环。线性系统没有极限环，只可能产生他激振荡，即在外来周期力作用下产生的周期运动。只有非线性系统可能存在极限环，只要有极限环，系统就可能在没有外部周期力驱动下由于本身的非线性效应而自发出现周期运动，即自激振荡。任何非线性系统在经过线性化处理后，产生自激振荡的根源就被当作次要因素忽略掉，必然对系统行为作出错误判断。非线性研究中对线性化方法的应用要特别注意，当问题涉及系统的振荡现象时，不可使用线性化方法。

极限环是相空间的闭合轨道，中心点周围也是闭合轨道，但二者有定性性质的不同。极限环是孤立的闭合轨道，它的周围不存在其他闭合轨道，只有螺旋型轨道。中心点是非闭合轨道，但其附近有无穷多条闭合轨道。设 $x(t)$ 是中心点附近的一条闭合轨道，对于 O 点的某个邻域内的任一实数 c ， $cx(t)$ 也是闭合轨道，中心点为单参数的闭合轨道族所包围。另一个区别是，中心点附近的闭合轨道既不相互吸引，也不相互排斥；极限环对周围的轨道要么吸引，要么排斥。极限环是一类定态，代表系统的一类典型的运动体制。中心点附近的闭合轨道是系统的扰动态，不代表系

系统的任何典型运动体制，只有被这些闭合轨道包围的中心点才代表系统的一种典型运动体制。

由于极限环有稳定与不稳定之分，非线性系统的自激振荡也有稳定与不稳定之分。稳定的自激振荡是可自行维持的，称为自持振荡。不稳定极限环对应的是非自持振荡。

并非任何非线性系统都存在极限环，因而并非一切非线性系统都可能发生自激振荡。如何判断一个非线性系统有无极限环，是非线性系统研究中具有重要理论和实际意义的问题。这个问题包括两个相反的方面。一是对于给定的系统，如何排除它存在闭合轨道。假定我们根据某些事实推断系统可能不存在闭合轨道，如何证实这一点？下述三种方法可以在一定范围内解决这个问题。

(1) 梯度系统无闭合轨道。给定非线性系统 $\dot{x}=f(x)$ ，如果存在一个势函数 $V(x)$ ，使得

$$\begin{aligned} f(x) &= -\nabla V(x) \\ &= -\frac{\partial V}{\partial x} \end{aligned} \quad (5.20)$$

则可断言，这个系统不可能存在闭合轨道。

(2) 如果对象不是梯度系统，但可构造一个类能量函数 $V(x)$ ，叫做李亚普诺夫函数，则可用类似梯度系统的方法排除闭合轨道。所谓李亚普诺夫函数 $V(x)$ 是一个连续可微的实值函数，具有以下性质：

i. V 是正定的，即 $x=x^*$ （不动点）时 $V(x^*)=0$ ，对于所有 $x \neq x^*$ ， $V(x) > 0$ ；

ii. 对于所有 $x \neq x^*$ ， $\dot{V} < 0$ 。

设 x^* 为系统 $\dot{x}=f(x)$ 的不动点。已经证明，如果可以构造李亚普诺夫函数，则不动点 x^* 是全局渐近稳定的，因而系统没有闭合轨道。

(3) Dulac 判据。给定系统 $\dot{x}=f(x)$, $f(x)$ 是定义在平面上某个单连通区域 R 上的连续可微函数。Dulac 判据断言, 如果存在一个连续可微的实值函数 $g(x)$, 满足某些条件, 则在 R 内不存在闭合轨道。

反问题是给定一个系统 $\dot{x}=f(x)$, 如何确定它有闭合轨道。回答此问题的理论根据是著名的彭加勒-本狄克逊定理。设 R 为平面上的一个有限闭区域, 其中不包含不动点, $f(x)$ 在包含 R 的某个开集上连续可微, C 为一条从 R 中某一点开始并始终在 R 之内的轨道, 则定理断言: 要么 C 是一条闭轨道, 要么 C 螺旋式地趋向于某条闭轨道。在每种情形下, R 内都包含一条闭轨迹。如图 5.13 所示。

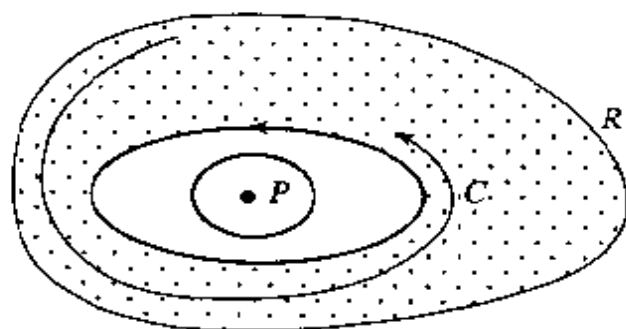


图 5.13

确定系统存在极限环之后, 动力学研究的任务之一是稳定性分析。稳定的极限环对应的是系统的自持振荡, 不稳定极限环对应的是系统的非自持振荡。如果作定量分析, 重要的是确定系统振荡的周期和振幅, 这些数量特性均由系统自身决定。

5.8 非线性系统的非平庸行为

线性系统不可能出现严格意义上的分叉、突变, 分叉、突变、滞后、多重吸引子共存等是非线性系统的本质特征。非线性系统不仅可能产生自激振荡, 而且能产生自组织运动、混沌运动等更

不平庸的行为。系统学的主题不是线性系统的平庸行为，而是非线性系统的各种非平庸的特征和行为。系统技术科学和系统工程的发展要解决的前沿课题，也是这些非线性问题。可以说，系统科学实质上是关于非线性系统的科学。

思 考 题

1. 什么是非线性特性？试考察自然、社会、思维、工程过程的非线性现象以说明“现实世界本质上是非线性的”。
2. 把非线性当作非线性来处理是非线性科学的方法论原则，为什么？
3. 试述线性与非线性的辩证关系，说明线性方法在非线性研究中的作用。
4. 非线性是现实世界无限多样性、丰富性、奇异性和复杂性的来源，为什么？
5. 试用多吸引子共存与相互竞争的原理来理解恩格斯关于历史发展的“合力论”。

阅 读 书 目

1. S. H. Strogatz; Nonlinear dynamics and chaos; with applications to physics, biology, chemistry and engineering, preface, chapter 1~4, 6~8。
2. J. M. T. Thompson, H. B. Stenmit; Nonlinear Dynamics and Chaos: Geometrical Methods for Engineers and Scientists, Preface, Chapter 1、2。
3. 朱照宣：《非线性力学讲义》，绪论，北京，北京大学力学系，1987。

4. D. K. Compbell:《非线性科学》,载《力学进展》,19卷,第2、3、4期。

5. 谷超豪:《非线性现象的个性和共性》,载《科学》(上海),1992(3)。

第 6 章 随机系统理论

第 3、4、5 章讨论的是确定性系统，即动力学方程的结构、系数、初始条件都是确定的。但真实系统都有某种不确定性，其中极其重要而且研究得相当成熟的是随机性这种不确定性。不论基础理论层次，还是技术科学层次，随机系统理论都属于系统科学的基本内容，是本书逻辑框架中应有的建制。鉴于它的数学工具对一般人文社会科学工作者更为陌生，本章仅限于介绍一些最初步的知识，不讨论随机系统理论的体系框架。

6.1 随机性

科学研究的任务可以一般地表述为这样一个问题：揭示条件的实现与事件的发生之间的关系。只要条件组 C 实现事件 A 一定发生，这种属性称为必然性， A 称为必然性事件。太阳从东方升起，人总有一死，均为必然性事件。在条件组 C 实现下事件 B 可能发生也可能不发生，这种属性称为或然性， B 称为或然性事件。股市暴跌，投掷硬币麦穗朝上，均为或然性事件。

仅就条件组 C 的某一次实现看，或然性事件的发生是完全不确定的。这就是人文科学中常讲的偶然性，没有科学研究的价值。但现实世界中的各种条件组常常是大量反复出现的，或者是人们可以反复进行试验的，形成所谓大数现象。在大数现象中，或然性事件 A 的出现频率显示出某种稳定性。例如，反复投掷硬币时

“麦穗朝上”事件出现次数约为投掷总数的 50%。事件出现频率具有稳定性的或然性，称为随机性。随机性是一种不确定性，但并非完全的不确定性。事件出现频率稳定也是一种确定性，即统计确定性。随机不定性与统计确定性是一个问题的两个相反的方面，即从相反的方向描述同一类现象的两个科学术语。随机性是具有统计确定性的或然性，随机现象服从统计规律。

随机性是客观世界固有的基本属性，把它归结于人类知识不完全是错误的。从物理领域到生物领域，从自然界到人类社会，从物质运动到思维运动，普遍存在随机性。处理随机性的基本工具是概率统计数学。但现代科学也用概率统计数学处理由于人们知识不完全导致对事件发生与否无法作出肯定判断的不确定性，使用所谓主观概率的概念。

随机事件分为离散型与连续型两种。我们就离散现象介绍描述随机性的几个最基本的数学概念。设在条件组 C 重复试验 N 次的过程中事件 A 出现 k 次， $\frac{k}{N}$ 代表 A 的发生频率。如果当 $N \rightarrow \infty$ 时，存在极限

$$\lim \frac{k}{N} = p \quad (6.1)$$

就称 p 为事件 A 的概率，有时记作 $p(A)$ 。概率满足条件

$$0 \leq p \leq 1 \quad (6.2)$$

$p=0$ 为不可能事件， $p=1$ 为必然事件，可看作随机事件的特例。

设在条件组 C 实现下共有 n 个基本可能事件 $A_1, \dots, A_n$ ，概率应满足归一性条件

$$p(A_1) + \dots + p(A_n) = 1 \quad (6.3)$$

随机现象的数量特性在相同条件下可能取不同的值，但这些值落在某个范围内的概率是确定的。描述这种现象需要随机变量概念。同一台机器生产同一规格的螺钉，其直径大小就是一个随

机变量。设一批产品共 100 件，内有 5 件次品，从中随便抽取 20 件，抽到的“次品数”也是一个随机变量。因为随着抽样结果，次品数可能是 0、或 1、或 2、或 3、或 4、或 5，随机变化，但各有一定的概率。更形式地讲，有

定义 如果对于条件组 C 实现下的每个可能结果 A 都唯一地对应到一个实数值 $X(A)$ ，则称实值变量 $X(A)$ 为一个随机变量。

或者说，按一定的概率去取某些确定的数值的变量，称为随机变量。

为描述随机变量，最重要的是了解它取每个可能值的概率。用某种形式把随机变量可能取的值与取该值的概率的对应关系表示出来，就得到它的概率分布

$$p_k = P\{X = x_k\} \quad (6.4)$$

一种简单的办法是采取如下列表形式

X	x_1	x_2	x_3	$\cdots$	x_k	$\cdots$
P	p_1	p_2	p_3	$\cdots$	p_k	$\cdots$

有了概率分布，随机变量的全部概率特性就知道了。但实际问题的概率分布往往难以确定，有效的方法是计算它的某些数量特征，特别是期望和方差。上表中离散随机变量 X 的期望，记作 $E(X)$ 或 EX ，定义为

$$E(X) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k p_k \quad k=1, 2, \cdots \quad (6.5)$$

既然随机性是在大数现象中表现出来的属性，就需要有一个能体现 X 取值的“平均”大小的数值。但 X 是随机变量，取不同值的概率即“机会”不同，算术平均不能反映这个特点，应当以概率加权计算平均值。(6.5) 同时满足了这两个要求。

X 的实际取值是在均值 $E(X)$ 周围随机变化，仅有均值是不

够的,还需知道 X 在均值周围的分散程度。这就需要方差的概念。给定离散随机变量的概率分布 (6.4), 它的方差定义为和数

$$D(X) = \sum_{k=1}^n (x_k - EX)^2 p_k \quad (6.6)$$

实际过程的随机变量往往依赖于某个参变量 (常常为时间 t), 表现为一个变量族。例如, 某电话站在从时刻 t_0 到时刻 t 这段时间内接受用户呼唤的次数, 就是依赖于时间的一族随机变量。依赖于时间或其他适当参量的一族随机变量的全体, 叫做随机过程。按其特性, 可分为马尔可夫过程和非马尔可夫过程、平稳过程和非平稳过程等。

6.2 随机系统

真实系统的环境中都有某种随机性, 对系统的行为特性产生影响。飞行器周围的气温、气压、特别是阵风, 具有随机性。企业系统所承受的市场需求和价格波动等, 是随机作用。真实系统自身也有随机性。飞行器动力装置的燃烧状况是随机的, 企业自身也存在各种随机因素。为了研究、操作、改进系统, 我们必须测量输入、输出、干扰等与系统有关的量, 观测仪器和操作过程的随机因素使测量结果为随机变量。一般来说, 真实系统都是随机系统, 确定性系统是对随机性可以忽略的随机系统的理论抽象。因此, 需要在系统研究中引入随机性观点, 建立随机系统理论。

另一方面, 所谓大数现象是一种系统现象, 群体行为是一种系统行为, 概率特性是一种系统特性, 即由于大量个体聚集在一起而形成的群体突现性。期望、方差等概念是刻画整体特性的数学概念, 概率方法是描述整体特性的方法。因此, 统计数学是系统科学强有力的工具。

随机系统也可以划分为静态的与动态的、线性的与非线性的、

连续的与离散的、定常的与时变的等类型。在静态系统理论中，随机性主要通过数学模型进入系统描述中。可能取输入为随机变量或随机过程，如服务系统的顾客为随机过程（见 14.5 节）；也可能是模型参量为随机量，如方程（3.6）中的系数 c_i 为随机数时描述的便是随机系统。

随机性可能通过以下三种途径进入动态系统：

（1）具有随机初始条件的动态系统 系统的数学模型是确定型微分方程，但我们知道的是统计意义上的初始值，即初始值的概率分布。如统计力学中保守系统的动态行为研究，空间弹道分析问题等。这是最简单也是最早被研究的随机微分方程。

（2）具有随机参量的动态系统 随机性进入动态系统数学模型的另一种方式，即动力学方程的系数全部或部分为随机数，导致系统的动力学规律具有随机性。一般形式为

$$\dot{x} = f[x(t), t, \varphi(t, \omega)] \quad (6.7)$$

其中， $\{\varphi(t, \omega), t \geq 0\}$ 为方程的随机系数。最简单的是以下 1 维线性系统

$$\dot{x} = \eta x \quad (6.8)$$

其中， η 为随机系数。

（3）具有随机作用项的动态系统 随机性进入动态系统数学模型的又一种形式，是在确定性动力学方程中加上随机作用项 $F(t)$ ，一般形式为

$$\dot{x} = f(x, t) + F(t) \quad (6.9)$$

这是最常见的、研究最多的情形。其中最简单且非常有用的是描述布朗运动的郎之万方程

$$\dot{x} = -ax + F(t) \quad (6.10)$$

浸泡在液体中的一个粒子（布朗粒子）受到周围液体粒子热运动引起的随机碰撞作用，可以粗略地比作球场上的足球。球速 v 取决于两种作用，一个是草地的摩擦力 $-\gamma v$ ， γ 代表摩擦系数，负号

表示摩擦力起阻止足球运动的作用；另一个是 $\Psi(t)$ ，代表球员给足球的随机冲击力。根据力学原理，足球总的运动方程为

$$m\dot{v} = -\gamma v + \Psi(t) \quad (6.11)$$

m 为足球质量。以 m 除上式，令 $a = \frac{\gamma}{m}$, $F(t) = \frac{\Psi(t)}{m}$, $x = v$ ，就得到方程 (6.10)。

实际的随机系统可能同时具有两种或三种随机因素。如在方程 (6.8) 中加入随机作用项 $F(t)$ ，得到如下随机动态系统

$$\dot{x} = \eta x + F(t) \quad (6.12)$$

若再考虑随机初值，就得到三种随机因素全具的系统。

随机系统理论是确定性系统理论与随机过程理论交叉结合的产物。原则上讲，确定性系统理论的基本问题也是随机系统理论的基本问题，前者的概念和方法一般均可推广于后者。但后者的难度更大，随机系统理论远不如确定性系统理论发达。^①

6.3 估计理论

定量地处理系统问题，不论分析还是综合，前提都是获得有关系统变量的精确数据。但有些系统变量无法直接进行观测。根据可直接观测量的数据去估算非直接观测量，这种操作就是估计。但实际情形并非如此简单。由图 6.1 可见，对象系统承受各种随机干扰，使得系统变量表现为一种随机量，观测系统 M 所接收到的是这种随机量。观测系统本身也受到随机干扰，包括环境的扰动、观测设施自身的噪声以及操作过程的随机因素。因此，实际观测到的数据总是随机变量，或者说它们与真实系统变量之间的误差是随机变量。从具有随机误差的观测数据中尽可能精确地获

^① 这个领域的一些深入工作，可参阅郭雷：《时变随机系统》，长春，吉林科学技术出版社，1993。

得系统特性的真实信息，这种操作称为估计。简言之，估计就是对观测数据进行去伪存真的处理。

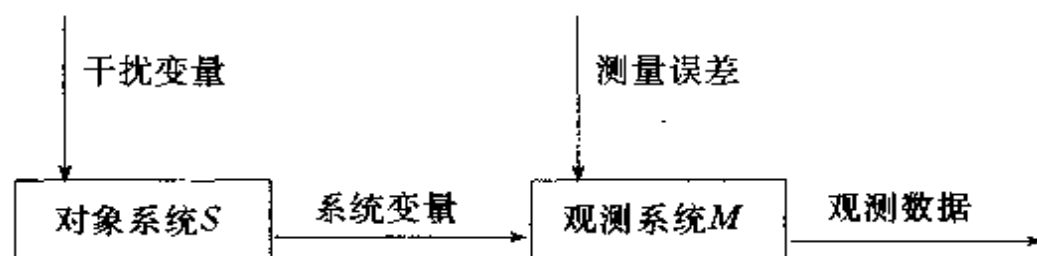


图 6.1

估计的系统意义，估计的分类，估计量的构造，估计的评价，性能指标的设定，估计的方法论，具体操作方法，特别是估计的算法，这些问题的研究形成了估计理论。由于实际问题几乎都是对随机变量的估计，估计理论的基本数学工具是概率统计。估计理论是随机系统理论的重要组成部分。

静态系统和动态系统都有估计问题，但估计理论主要用于动态系统。按估计量的系统意义，可分为参数估计和状态估计两种。在已知系统数学模型的结构时，根据系统输入、输出的观测数据估计模型中的参数，称为参数估计。根据输入、输出的观测数据估计系统的内部状态，称为状态估计。参数估计是构造一个平稳过程使之收敛于真实的参数值的问题，随机过程的平稳性允许以简单的统计性质来计算估计量。随机动态系统的状态估计往往是一种非平稳过程，须用较复杂的统计性质来计算估计量。

设待估计的变量为 x ，以 $\hat{x}$ 记对它的估计，观测数据序列计为 $\{z_1, \dots, z_j\}$ 。估计的前提是假定 $\hat{x}$ 为观测数据序列的函数

$$\hat{x} = \Phi(z_1, \dots, z_j) \quad (6.13)$$

重要的是函数 Φ 的构形，需要根据对象系统和问题要求的不同来确定。最简单的是带有测量误差的被测量值 x 的估计，以算术平均值 $\bar{x}$ 为估计量。设已获得对 x 的 j 次有误差的测量 $\{x_1, \dots, x_j\}$ ，

则

$$\hat{x} = \bar{x} = \frac{1}{j} \sum x_i \quad (6.14)$$

可看作等概率 ($p = \frac{1}{j}$) 情形下的随机估计。

依观测数据与待估计状态在时间上的相对关系, 状态估计可分为三类: 预测估计, 滤波估计, 平滑估计。我们就离散动态系统加以说明, 系统特性如图 6.2 所示。

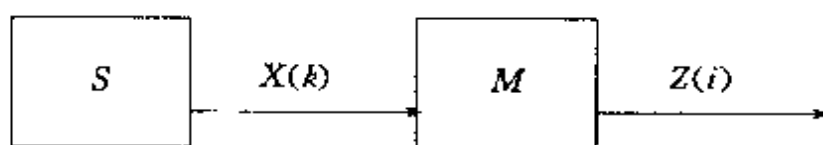


图 6.2

设已获得观测数据 $z_1, \dots, z_j$, 用它们估计 k 时刻的状态量 $x(k)$, 估计量记作 $\hat{x}\left(\frac{k}{j}\right)$, 则

1) $j < k$ 为预测估计, 即对未来状态的估计, 估计 k 时刻的状态只能用 k 时刻以前的观测数据;

2) $j = k$ 为滤波估计, 即实时估计当前时刻的状态;

3) $j > k$ 为平滑估计, 即对过去状态的估计。

换作连续时间 t , 这些表述完全适用于连续动态系统。

在理想情形下, 估计量与待估计量相等, 即 $\hat{x}\left(\frac{k}{j}\right) = x(k)$, 称估计是准确的。实际情形很难如此, 需要计算估计误差。令

$$\Delta x\left(\frac{k}{j}\right) = x(k) - \hat{x}\left(\frac{k}{j}\right) \quad (6.15)$$

记估计误差。 $\Delta x\left(\frac{k}{j}\right) = 0$ 为准确估计, $\Delta x\left(\frac{k}{j}\right) \neq 0$ 为不准确估计。为评价不准确的估计, 引入损失函数 $L = L\left[\hat{x}\left(\frac{k}{j}\right)\right]$, L 为 n 个状态变量的标量函数, 当估计误差为 0 时, $L = 0$ 。损失函数还

应满足某些其他特殊条件，有多种不同形式，构造损失函数难免包含使用者的偏好。

估计的评价通常分“过得去的”和“最优的”两种。损失函数 L 也是随机变量，确定 L 后，通常取它的数学期望 J 为性能指标

$$J\left[\Delta x\left(\frac{k}{j}\right)\right]=E\left\{L\left[\Delta x\left(\frac{k}{j}\right)\right]\right\} \quad (6.16)$$

来评价损失 L 的大小， J 最小的就是最优估计。可见，所谓最优估计并非损失最小，而是使损失的均值（数学期望）最小，亦即统计平均意义上的最优。这样，最优状态估计可确切表述如下：给定观测数据 $z(1), \dots, z(j)$ ，如果一个估计 $x\left(\frac{k}{j}\right) = \hat{x}_k[z(1), \dots, z(j)]$ 能使性能指标 $J\left[\Delta x\left(\frac{k}{j}\right)\right]$ 为最小，就称它是状态量 $x(k)$ 的一个最优估计。

6.4 随机稳定性

给定随机动态系统

$$\dot{X}=G[X, t, \xi(t, \omega)] \quad (6.17)$$

t 为时间， X 为状态向量， $\xi(t, \omega)$ 代表随机作用力或其他随机因素。确定性系统的各种稳定性概念，如局部稳定与大范围稳定，渐近稳定与非渐近稳定，轨道稳定与输入—输出稳定，在随机情形下均有对应物。但随机情形下的稳定性问题有更大的多样性，且是按概率论语言刻划的，描述的是统计意义下的系统稳定性。本节只涉及系统 (6.17) 的特解 $X=X^*(t, \omega)$ 的稳定性问题。

设系统 (6.17) 满足条件

$$G[0, t, \xi(t, \omega)] \equiv 0 \quad (6.18)$$

$X(t) \equiv 0$ 为其平凡解（平衡态）， X_0 代表初值扰动。我们介绍几种关

于平凡解的稳定性概念。注意,它们都是在统计意义下的稳定性。

(1) 弱随机稳定 如果对每个 $\epsilon > 0$ 和 $t_0 > 0$, 存在一个 $\delta > 0$, 使得当 $t \geq t_0$ 和 $|X_0| < \delta$ 时, 就有

$$p\{|X(t, \omega; X_0, t_0)| > \epsilon\} < \epsilon \quad (6.19)$$

则称平衡解 $X(t) \equiv 0$ 是弱随机稳定的。

这是确定性系统 L 稳定性概念的推广, 在初值偏离足够小时, 并不要求每个 $X(t)$ 的偏离都足够小, 而是要求不满足条件的 $X(t)$ 的发生概率 p 足够小, 即满足统计意义下的 L 稳定性要求。

(2) 弱随机渐近稳定 如果平衡解是弱随机稳定的, 且对每一 $\epsilon > 0$, 存在一个 $\delta = \delta(\epsilon) > 0$, 使得当 $|X_0| < \delta$ 时, 有

$$t \rightarrow \infty, \lim p\{|X(t, \omega; X_0, t_0)| > \epsilon\} = 0 \quad (6.20)$$

就称平衡解是弱随机渐近稳定的。

与确定性系统一样, 渐近稳定性是对稳定性的更强要求, 但不是要求一切特解 $X(t)$ 趋于 0, 而是要求不满足要求的特解的发生概率 p 趋于 0, 即满足统计意义下的 L 渐近稳定性要求。

(3) p 稳定 如果对每个 $\epsilon > 0$, 存在一个 $\delta > 0$, 使得当 $t \geq t_0$ 和 $|X_0| < \delta$ 时, 有

$$E|X(t, \omega; X_0, t_0)|^p < \epsilon \quad (p > 0) \quad (6.21)$$

就称平衡解是 p 稳定的。 $p=1$ 为均值稳定性, $p=2$ 为均方稳定性。

(4) 渐近 p 稳定 如果平衡解是 p 稳定的, 且对于充分小的 $|X_0|$, 有

$$t \rightarrow \infty, \lim E|X(t, \omega; X_0, t_0)|^p = 0 \quad (6.22)$$

就称平衡解是渐近 p 稳定的。

在随机情形下, 判别稳定性的基本依据仍然是李亚普诺夫直接方法, 构造随机李氏函数 $V(x)$ 。这里同样没有普适的构造方法。^①

① 有关随机稳定性的详细理论分析, 可参阅胡宣达:《随机微分方程稳定性理论》, 南京, 南京大学出版社, 1986。

原则上说,前几章所述确定性动态系统理论的基本概念均可推广到随机系统理论。但这方面成熟的理论成果不多,本章不作进一步的讨论。

思 考 题

1. 辨析下列概念:确定性,偶然性,随机性。
2. 存在随机性是宇宙的固有特征抑或随机性仅仅是人类智力有限性的产物?
3. 系统科学如何克服完全决定论的弊病?

阅 读 书 目

1. H. 哈肯:《协同学》,第6章,北京,原子能出版社,1984。
2. G. N. 萨里迪斯:《随机系统的自组织控制》,第1、3章,北京,科学出版社,1984。

第7章 自组织系统理论

7.1 概 述

在现实世界的不同领域和层次上，随处可以看到各种各样的结构、模式、形态。在物理层次上，有晶体、山峦、云团、星球等。在生命层次上，有形形色色的花卉、树木、形态迥异的飞禽走兽等。在社会领域，有家庭、社区、村镇、城市、国家等。在精神领域，有语言、概念、理论、文化等。这些结构、模式、形态是如何产生的？如何演化的？有无支配它们的一般原理？回答此类问题从古以来就是对人类智力的巨大挑战。历史上先进的哲学学说把它们判定为事物“自己运动”的产物，只是一种思辨的回答，虽然正确，却没有揭示出事物如何“自己运动”的机制。只有自组织理论能够提供科学的答案。

第一批自组织理论出现于19世纪中叶。达尔文的进化论是生物学的自组织理论，自然选择（或物竞天择）原理就是一种自组织原理。马克思的五种社会形态演进理论是关于社会历史的自组织理论，生产力决定生产关系、经济基础决定上层建筑的原理是对社会历史系统自组织机制的一种理论阐述。相变理论是物理学的自组织理论，系统地解释了物质三态转变的机理。三者都是某个特定领域的自组织理论，但都未提出和使用自组织概念。前两种理论还停留于对自组织现象的定性描述，尚不满足现代科学的

规范要求。相变理论是关于自组织现象的定量描述，但限于物理学范围，且只能描述平衡过程的自组织。在当时的科学水平上，不可能提出和建立一般的自组织理论。

20 世纪中叶，情形有了根本的改观。相变理论经过几十年的发展，对平衡相变的机制和规律有了本质的了解，为非平衡相变研究创造了条件。早期的系统理论家，特别是阿希贝和维纳，明确提出建立自组织理论的学科任务，阿希贝还出版了专著《自组织原理》。

更重要的是，60 年代末以后，出现了一批以揭示一般自组织规律为目标的科学学派，代表人物有普利高津、哈肯、艾根等，提出耗散结构论、协同学和超循环论，以现代科学的前沿成果为依据，建构描述自组织现象的概念框架。还应提到圣塔菲学派的工作。以阿瑟（B. Arthur）、考夫曼（S. A. Kauffman）、朗顿（C. G. Langton）、霍兰德（J. H. Holland）等人为代表，这个学派在 80 年代以来给自组织理论以新的强有力的推动。

成熟的自组织理论应是系统学的核心部分，至少是核心部分之一。但目前还没有建立起这种理论。一方面，各个学派都提出许多非常深刻而诱人的概念、原理和方法，使人们强烈地意识到自组织理论的辉煌前景。另一方面，不同学派或不同学者的理论都有自己的特殊背景，普遍性不够，各自只给出自组织理论的一些片断，许多提法是含混的，相互之间还有矛盾。要把这些片断整合成一个自治的概念体系，给自组织现象以系统的、连贯的、深刻的解释，还有很多很大的困难。

本章不奢望给出自组织理论的体系框架，只对最基本的内容作些介绍。

圣塔菲学者提出一种估计，认为 20 年至 30 年之后，真正的自组织理论即可诞生。他们的估计可能过分乐观，但预期这种理论在 21 个世纪成熟起来，当无问题。

7.2 自组织类型

现代科学还难以给出自组织的普适分类，一些已提出的分类各自带有明显的学科背景的局限，不可简单地推广于其他领域，但仍有广泛的参考价值。

相变理论基于热力学把相变分为两大类。如果发生相变时系统的热力学势函数连续，但其一阶导数不连续，称为一阶相变。特点是势函数代表的物理性质连续变化，但其一阶导数代表的物理性质在相变点发生突变。如果相变时势函数及其一阶导数都连续，称为二阶相变，或连续相变。二阶相变的特点是势函数及其一阶导数代表的物理性质在相变时都连续变化，不会出现突然间断现象。严格地说，这是热力学系统的分类。但对更广泛的自组织现象，都很有启发意义，二阶相变尤其如此。如圣塔菲学派把发生在混沌边缘的自组织作为二阶相变的对应物来理解，颇有见地。

普利高津把自然界自组织产生的结构分为两类。通过平衡过程中的相变而形成的有序结构，称为平衡结构，如晶体、超导体等。平衡结构的基本特点是无须与外界环境进行交换即可保持其结构，甚至只有隔断与外界的联系才能长久保持自己。系统在远离平衡态的条件下通过相变而形成的有序结构，称为耗散结构，其基本特点是只有与外部环境不断交换物质、能量、信息，才能保持有序结构。这种分类是以现代热力学为根据给出的，但耗散结构十分广泛，不仅存在于物理界，一切生命系统和社会系统都是耗散结构，精神领域的各种系统，如语言、科学理论、文化形态等，也是耗散结构。经过进一步提炼，耗散结构有可能成为系统学的重要概念。

哈肯按照引起自组织运动的不同方式给出一种分类：(1) 改变控制参量引起的自组织；(2) 改变组分数引起的自组织；(3) 瞬

变引起的自组织。这里完全抛开物理学或其他具体学科的背景,用动态系统理论的语言进行表述,已经属于系统学的分类。但是否属于完备的分类,还有待研究。

7.3 自组织判据

一个系统在演化过程中是否建立起某种结构、形成某种模式、创造某种形态,应有确切的判别根据,特别希望能以精确的数学工具来判别。自组织理论尚不成熟的重要标志是目前还没有这种判据。不同自组织理论分别提出自己的判据,一般还不能通用。主要有以下几种:

自由能判据 这是相变理论的判据。令 E 记系统的总能量, F 记系统的自由能, T 记绝对温度, S 记热力学熵,它们满足以下公式

$$F = E - TS \quad (7.1)$$

相变理论认为,平衡相变是由自由能 F (表示系统的组织程度) 与热力学熵 S (表示系统的混乱即无组织程度) 之间的竞争所推动的, F 与 S 达成的某种妥协,决定了系统采取某种最小自由能状态,从一般状态自发演化到最小自由能状态就是实现了自组织。最小自由能原理解释了相变的宏观机理。玻耳兹曼进一步以概率观点给相变以微观的解释,提出微观粒子的能级分布公式

$$P_i = \exp \left(\frac{-E_i}{KT} \right) \quad (7.2)$$

其中, E_i 为第 i 能级的能量, P_i 为粒子占据该能级的概率, K 为玻耳兹曼常数。(7.1) 与 (7.2) 一起称为玻耳兹曼有序性原理,完整地解释了形成平衡结构的自组织过程。

熵判据 粗略地讲,熵是系统无序程度的度量,即系统无组织程度的度量。组织的建立和瓦解过程都是熵变过程。从无组织

到有组织，从低组织度到高组织度，是系统的反熵过程。自组织是系统在无外界干预下自我反熵的过程。令 dS 记系统的熵的改变量（微分）， $dS > 0$ （增熵）表示组织程度减小的变化， $dS < 0$ （减熵）表示组织程度增加的变化，因而熵的变化可以作为自组织的判据。相变理论最早把熵 S 作为判据。普利高津加以推广，用熵作为非平衡相变的判据，提出超熵概念，建立耗散结构论。但熵判据有很大局限性，不仅要求对象能够作为热力学系统来研究，而且只有在能够给出熵 S 的可计算数学形式时才有实际意义，这只在很有限的情况下能够做到。哈肯认为熵判据太粗糙是有道理的。

信息判据 信息是负熵，有序度、组织度增加的过程是系统增加信息的过程，有序度、组织度减少的过程是系统损失信息的过程。因此，一些系统理论家，特别是控制理论家，试图以系统信息量的变化作为自组织的判据，令 γ 记系统的剩余度（详见 11.4 节）

$$\gamma = 1 - \frac{H}{H_m} \quad (7.3)$$

γ 在 0 与 1 之间取值， $\gamma = 0$ 表示系统完全无序，系统增加信息意味着增加剩余度，即

$$\frac{d\gamma}{dt} > 0 \quad (7.4)$$

在系统自组织过程中，信息熵 H 和最大熵 H_m 都是时间的函数。将 (7.3) 代入 (7.4)，有

$$H \left(\frac{dH_m}{dt} \right) > H_m \left(\frac{dH}{dt} \right) \quad (7.5)$$

最大熵 H_m 由系统的规模（可能状态数）决定， $\frac{dH_m}{dt} > 0$ 表示系统不断增加状态和元素，相当于系统从环境中吸收营养而不断壮大其规模，即自我组织。 $\frac{dH}{dt} < 0$ 表示系统通过实践和学习不断从外

界获取信息,增加有序度,也是自我组织。^①但把 H 和 H_m 表示为可计算的形式有很多困难,信息判据 (7.5) 的适用范围可能更小。

序参量判据 如果宏观变量 P 当系统处于无序状态时为 0,处于有序状态时不为 0, P 的性质可以指示有序结构的产生和转变,则称 P 为系统的一个序参量。相变理论最先提出序参量概念。哈肯把它推广到非平衡相变,提出序参量原理,建立了有广泛应用的协同学。但序参量判据也不是普适的,像生命、社会、思维等复杂系统,一般难以确定有效的序参量。哈肯把语言、科学学派等作为序参量,只在隐喻的意义上有价值,无法对系统作出定量描述(有人因此而建议称为序因子),也就无法应用协同学原理处理这类问题。

非线性动力学没有明确提出自组织判据问题。它以稳定定态概念来表征系统结构,到达稳定定态就意味着建立起一定的有序结构,从一个稳定定态向另一个稳定定态转变就是从一种有序结构向另一种有序结构转变。这实质上也是一种判据,只要有了系统的动力学方程,即可按严谨的数学方法作出判断,十分有效。但当面临没有或无法建立动力学方程的复杂系统时,这种方法也无助于解决问题。

7.4 自组织原理

自组织理论的基本信念是:尽管现实世界的自组织过程产生的结构、模式、形态千差万别,必定存在普遍起作用的原理和规律支配着这种过程。现代科学还不能系统地揭示自组织的一般规律,但已获得许多深入的认识,提出一系列自组织原理,主要有:

^① 参见王鼎昌:《“量-质”信息与控制论系统》,载《信息与控制》,1981 (1)。

突现原理 一种自行组织起来的结构、模式、形态，或者它们所呈现的特性、行为、功能，不是系统的构成成分所固有的，而是组织的产物、组织的效应，是通过众多组分相互作用而在整体上突现（涌现）出来的，是由组分自下而上自发产生的。自下而上式、自发性、突现性是自组织必备的和重要的特征。

开放性原理 一个与环境没有任何交换的封闭系统不可能出现自组织行为，对环境开放即与外界进行物质、能量、信息交换的系统才可能产生自组织运动。普利高津以总熵变公式

$$dS = d_i S + d_e S \quad (7.6)$$

为工具，科学地论证了开放性是自组织的必要条件。如图 7.1 所

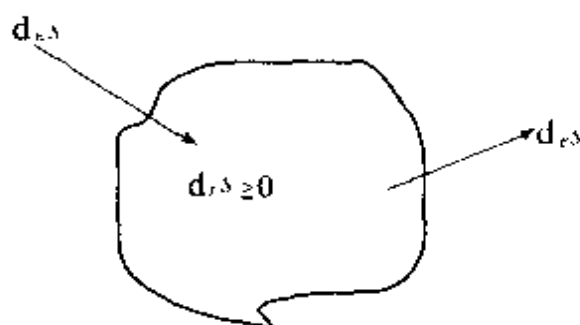


图 7.1

示， $d_i S$ 是系统内部混乱性产生的熵，称为熵产生，热力学原理保证熵产生为非负量， $d_i S \geq 0$ ； $d_e S$ 是系统通过与环境相互作用而交换来的熵，称为熵交换或熵流，可正可负。有四种可能情形：

(1) $d_e S = 0$ ，系统是封闭的，与外界没有交换，内部的熵产生使系统混乱程度不断增加，不可能出现自组织，只可能有组织的退化；

(2) $d_e S > 0$ ，与外界交换得到的是正熵，总熵变 $dS > 0$ ，系统以比封闭状态下更快的速度增加混乱程度，不会发生自组织；

(3) $d_e S < 0$ ，但 $|d_e S| < d_i S$ ，通过对外开放从环境中取得负熵，但从环境得到的负熵不足以克服内部的熵增加，总熵变 $dS = d_i S + d_e S \geq 0$ ，系统也不会发生自组织；

(4) $d_e S < 0$, 且 $|d_e S| > d_i S$, 从环境中得到的负熵大于内部的熵增加, 总熵变 $dS < 0$, 系统出现减熵过程, 即自组织过程。

上面的论证表明, 对外开放是系统自组织的必要条件, 封闭系统不可能出现减熵运动; 但开放性只是自组织的必要条件, 错误的开放从外界得到的是正熵, 必将导致系统有序结构更快的瓦解; 正确的开放才能从外界得到负熵, 但若开放程度不够, 通过熵交换从外部得到的负熵不足以克服自身的熵增加, 仍然不能出现自组织。只有正确而又充分地对外开放, 才能保证系统出现自组织。

以上论证只对于明确定义了可计算熵的系统才有实际意义。但在隐喻的意义上, 其结论适用于一切系统。

系统从无到有的自组织运动是逐步区分内部与外部, 把自己与外部环境区分开来。因此, 系统不仅要有开放性, 同时要有封闭性或隔离机制, 以保证已积累的信息和能量不至流失, 防止外部有害因素的侵袭。自组织过程是系统开放性与封闭性的统一。

非线性原理 满足叠加原理的线性系统无法产生整体突现性, 整体突现性是系统组成部分之间、系统与环境之间非线性相互作用的产物, 是典型的非线性效应。组分之间的相互作用大体分为合作和竞争两种形式, 都是系统产生自组织行为的动力。没有组分之间的合作, 没有系统与环境之间的合作, 不会有新结构的出现。没有组分之间的竞争, 特别是没有系统与环境中的其他系统的竞争, 也不会有新结构的出现。合作与竞争本质上是非线性的。线性的相互作用至多能产生平庸的自组织, 真正的自组织只能出现在非线性系统中, 而且要有足够强的非线性才行。

反馈原理 把系统现在的行为结果作为影响系统未来行为的原因, 这种操作称为反馈。以现在的行为结果去加强未来的行为, 是正反馈。以现在的行为结果去削弱未来的行为, 是负反馈。新

的结构、模式、形态在开始时总是弱小的，需要靠系统的自我放大（自我激励）机制才能生长、壮大。这就是正反馈机制。新系统常常是先生成它的基核，再凭借正反馈机制逐步长大。但新结构不能一直生长下去，到一定程度就应稳定下来，不再增加规模，即系统应有自我抑制（自我衰减）机制。这就是负反馈机制。正反馈与负反馈适当结合起来，才能实现系统的自我组织。线性系统要么有正反馈而无负反馈，要么有负反馈而无正反馈；非线性系统才可能同时有正反馈和负反馈，把两者适当结合起来，使系统能够自我创造、维持和更新。

不稳定性原理 新结构的出现要以原有结构失去稳定性为前提，或者以破坏系统与环境稳定平衡为前提。但新结构只有能够稳定下来才算确立了自己，并在环境中存续运行下去。一个不具备稳定机制的系统不可能真正产生出来，更不可能保持自己。自组织是稳定性与不稳定性的统一。鉴于不稳定性对自组织过程具有革命性意义，按照哈肯的说法，统称为不稳定性原理。线性系统要么稳定，要么不稳定，不可能同时存在稳定轨道和不稳定轨道；非线性系统可能同时存在稳定轨道和不稳定轨道，甚至同一条轨道部分稳定、部分不稳定，因而能够既使旧模式失稳，又使新模式稳定下来，从而产生自组织。

支配原理 系统内部的不同组分、要素、趋势、力量、变量、模式之间如果不分伯仲，一样的起作用，系统就不会形成有序结构；只有形成少数趋势（或力量、模式、中心部分等）去引导、规范、支配大量其他组分、要素、趋势、模式等的行为，使它们协同动作，才能形成有序结构。这种起支配作用的模式或力量，哈肯称为序参量，也就是亚当·斯密称为“看不见的手”的东西。这种支配模式是在组分之间、系统与环境之间相互合作与竞争中形成的，反过来，系统的组分、要素又是在这种模式的支配下相互合作与竞争，从而建立系统的有序结构的。不能在不同模式之间

形成支配-服从关系的群体，不会出现有序结构。

涨落原理 状态量对其平均值的偏离，称为涨落。涨落的特点是随机生灭，或大或小。按其来源，有内涨落和外涨落之分；按其规模，有小涨落、大涨落、巨涨落之分。一切真实系统都存在涨落。涨落在自组织中起极为重要的作用，系统通过涨落去触发旧结构的失稳，探寻新结构，系统在分叉点上靠涨落实现对称破缺选择，建立新结构。如图 7.2 所示， x_1 和 x_2 是系统的两个稳定态，系统处于 x_1 ，但 x_2 是更优越的状态，如果没有足够强的涨落推动，系统就不可能越过中间的势垒 $\bar{x}$ (极大点)，发现并趋达 x_2 。所以，普利高津认为，涨落导致有序。

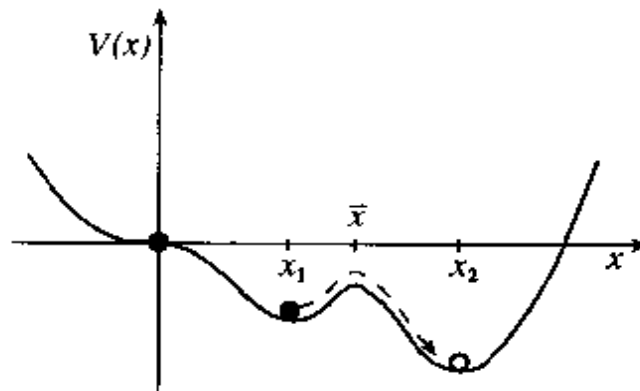


图 7.2

环境选择原理 在系统自组织过程中，一种结构或模式、特别是活的结构或模式，要接受环境的评价和选择，被环境选择的系统不一定是各方面最优者，但必定是能与环境协调共存者，至少是为环境允许存在者。这是广义达尔文原理。

7.5 自组织的描述方法

自组织过程是系统组分之间的互动互应过程，一个组分的行为变化，必然引起其他组分的回应，发生相应的行为变化，又反过来影响到该组分，形成复杂的互动互应网络关系。系统与环境

之间也有互动互应，系统的每一变化都引起环境的回应，环境的每一变化也引起系统的回应。正是在这种互动互应过程中，系统不断试探、学习和自我评价，寻找新的结构和行为模式，接受环境的评价和选择。因此，自组织过程必定是一种动态过程。

现代科学的方法论建立在理论、实验、计算三大支柱上。理论方法的核心是建立数学模型。计算是指在电脑上进行数值模拟——一种新的实验方式，叫做数值实验。三种方法在自组织理论研究中均有大量应用。

作为动态过程的自组织运动，须以动力学方程作为数学模型。由于不存在特定的外部作用，自组织系统的数学模型，不论连续的或离散的，只能是齐次方程。第3~5章讨论的基本都是齐次方程描述的系统，因而提供了刻画自组织的适当工具。

对于物理化学系统中的简单自组织现象，一般可以建立数学模型，可以进行真实的实验研究。对于生命、社会、思维领域的复杂自组织现象，一般没有有效的数学模型，进行真实的实验研究也很有限。最适用的方法是在电子计算机上做数值实验，模拟实际系统的自组织现象。早期系统理论家维纳、申农、阿希贝等人首先应用这种方法研究自组织，现代系统理论家、特别是圣塔菲的学者更把电脑模拟作为研究自组织的基本手段。

关于自组织现象的另一种属于系统科学的分类，是按照自组织过程实现的不同系统功能或方式来划分的，包括：自创生，自生长（发育），自校正，自镇定，自适应，自维生，自学习，自复制，自修复，自更新，等等。在实际系统中，同一自组织过程常常同时包含几种方式。例如，自适应常常包含自学习，通过自学习而达到适应环境。复杂系统的自创生，如地球上第一个活细胞的创生，必定同时包含自镇定、自维持、自学习、自适应、自复制等。

下面四节将分别讨论其中的一种自组织形式。

7.6 自创生

系统的自创生,英文为 autopoietic,本意指在没有特定外力干预下系统从无到有地自我创造、自我产生、自我形成。一些作者把系统的自我更新、自我修复也算作自创生,容易引起误解。就复制出来的个体而言,作为从无到有的新产物,有创生的意思,但复制必须先有一个样本或母体,复制体的结构并非真正新的创造。自我更新亦然。严格意义上的自创生应指在没有样本或母体的条件下,一种全新的结构、模式、形态从无到有地自我产生出来。世界上第一个活细胞的出现是自创生,活机体中常见的细胞复制不是自创生。

第2章指出,新系统产生的基本方式是差异的整合,即许多被当作未来系统的元素和子系统的事物或实体经过整合而形成统一整体。从未被整合的事物群体(集合)到经过整合形成具有新的突现性的统一整体,就是新系统的创生过程。如果这种整合是在没有特定外力干预下自发完成的,就是系统的自创生。除人类有意识地创建的系統外,现实世界的系统都是自我创生的。

设想在同一环境中出现大量不同的实体或小系统,由于同一环境的制约,它们逐渐发生相互联系、相互作用、相互回应,以至每一个实体的变化都受到其他实体的影响,并影响其他实体的变化。但多个实体之间存在相互作用不等于形成一个新系统,可能只是互为环境,对A来说,A与B的相互作用属于A与它的环境相互作用的一部分。但如果其中的 n 个实体或小系统通过相互作用以及与环境其他实体的相互作用而整合成为一个统一体,区分开内部与外部,就表示创生出一个包含这 n 个组分的新系统。其本质差别是后者产生了整体突现性,而前者没有出现这种整体突现性。确切的判据是,后者作为整体具有统一的稳定定态,前

者不存在稳定定态。

研究这种系统自创生的理想手段是动力学方法。设有 n 个（一般应为巨量的）实体或小系统，各有自己的动力学方程，且互不耦合。假定从某一时刻起，彼此开始相互作用，每一个的变化都引起其余系统的回应。这种互动互应关系发展到一定程度，总体上可以用一个联立方程组描述。一般来说，这是一种反复试探、评价、修正、选择的过程，动力学规律（方程的数学结构）和控制参量都在变化中。为简化描述，假定第一步是其中的 n 个实体或小系统形成确定的联立方程组描述它们的相互关系，但控制参量的选择尚未保证这个联立方程组具有稳定定态，即还没有形成具有特定整体突现性的系统。第二步是控制参量变化，在控制空间中搜索，一旦得到稳定定态，动力学特性最后固定下来，就形成一个包含 n 个组分的新系统。这就是系统的自创生。

最简单的情形是环境中有两个小系统，动力学方程分别为

$$\dot{x}=f(x) \quad (7.7)$$

$$\dot{y}=g(y) \quad (7.8)$$

由于环境的变迁或自身的演化，二者出现了耦合，运动方程变为

$$\dot{x}=f(x)+p(x,y) \quad (7.9)$$

$$\dot{y}=g(y)+q(x,y) \quad (7.10)$$

$p(x,y)$ 与 $q(x,y)$ 表示 x 与 y 的耦合作用。在数学上，(7.9) 和 (7.10) 构成的联立方程组就是一个 2 维系统。广义地说，这就是系统的自创生。但在系统学中，只要这个联立方程组没有稳定定态，即没有形成整体的结构和行为模式，它还不能代表一个系统，仍然是同一环境中两个相互影响的不同系统。但环境在变化，这两个系统也在变化。一旦联立方程组获得至少一个稳定定态，就表示二者已经整合为一个较大的系统，产生了由稳定定态代表的整体突现性。从 (7.7) 与 (7.8) 开始耦合到联立方程 (7.9) 与

(7.10) 出现稳定定态的过程就是两个小系统的整合过程，即新的较大系统的自创生过程。在动力学理论中，为简化分析，假定动力学规律已经形成，要讨论的自组织运动是在控制空间中寻找稳定定态。控制空间分为甲、乙两部分，设甲区无稳定定态，乙区有稳定定态。控制参量从甲区向乙区的变化并在乙区中搜寻稳定定态的过程，就是系统的自创生过程。

讨论两个线性系统 $\dot{x}=ax$ 和 $\dot{y}=ey$ 的整合。设它们的耦合形式为

$$\begin{aligned}\dot{x} &= ax + by \\ \dot{y} &= cx + ey\end{aligned}\quad (7.11)$$

如果经过一定的演化过程系数 a 、 b 、 c 、 e 获得适当的数值，使这个联立方程组有了非 0 稳定定态，就意味着二者整合为一个新的 2 维系统。这表明，线性系统并非完全不可能出现自创生，但只能出现平庸的自创生，即只能形成由平衡态代表的整体突现性。

令 x 代表食用植物 A 的草食动物的种群成员数，当它与某种肉食动物（以 y 记其种群成员数）走到同一环境中，就出现了捕食与被捕食的关系。经过一定的演化过程，相互之间形成由洛特卡-沃尔特拉方程描述的关系

$$\begin{aligned}\dot{x} &= k_1 Ax - k_2 xy \\ \dot{y} &= k_2 xy - k_3 y\end{aligned}\quad (7.12)$$

容易证明，这个方程组存在非 0 稳定定态 $S(x_0, y_0)$ ：

$$x_0 = \frac{k_3}{k_2}, \quad y_0 = \frac{k_1 A}{k_2} \quad (7.13)$$

这是一个中心点型定态，如图 7.3 所示。

从两种动物 x 与 y 走到同一环境开始，到形成 (7.12) 所示的耦合关系，再演化到稳定定态 (7.13)，它们终于整合为一个生态系统。

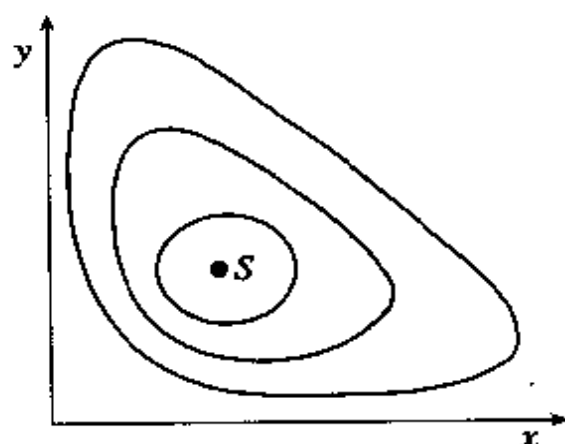


图 7.3

以下方程

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A + x^2y - Bx - x \\ \dot{y} &= Bx - x^2y\end{aligned}\quad (7.14)$$

是普利高津为首的布鲁塞尔学派为解释化学反应现象提出来的，称为三分子模型或布鲁塞尔器，也可以解释生物钟、生态系统等。 S 为均匀定态， B 小于临界值时稳定。如果两种动物在适当的环境中建立了这种相互作用，并当控制参量 B 超过临界值时，即

$$B > 1 + A^2 \quad (7.15)$$

均匀定态失稳，方程组 (7.14) 出现一个稳定极限环，从不同初值出发的运动都趋于同一周期轨道，表示两种动物通过相互作用自我组织成为一个有稳定周期的生态系统，如图 7.4 所示。周期性表示，随着草食动物规模增大，肉食动物的规模也增大，导致草食动物减少，然后肉食动物也减少，又导致草食动物再次增大，如此循环往复。

这种现象在自然界是常见的。具有周期性稳定定态的自组织只能出现于非线性系统中。

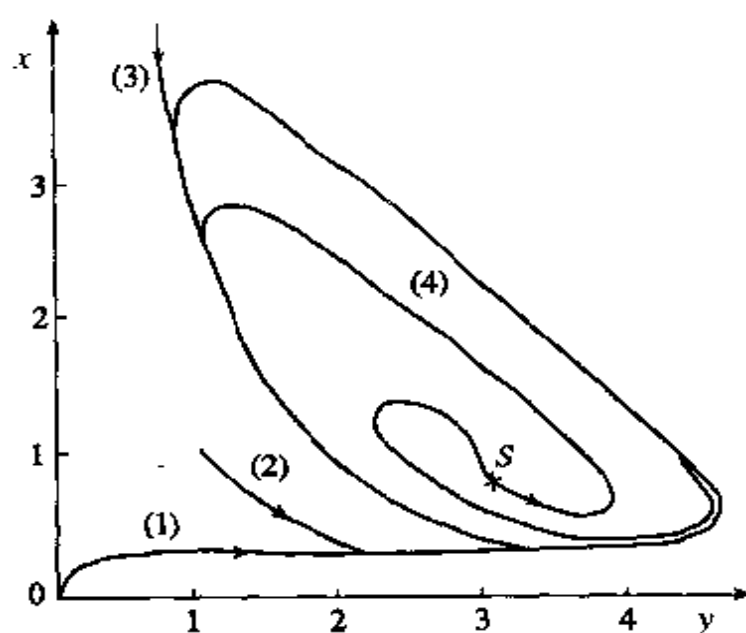


图 7.4

复杂系统的自创生不是单纯的自整合过程,还包含自稳定、自维持、自适应、自学习、自复制等多种自组织形式。一个典型的例子是第一个活细胞的自创生,探索它的机理是自组织理论的重大课题。著名的理论方案之一是艾根的超循环论,假定早期地球已经分别进化出具有自催化、自复制、自适应能力的前体,即原始蛋白体和原始核酸。要把这种前体整合成细胞,还须有更精致的系统机制和更有效的组织模式。艾根认为,线性链式耦合或分支式耦合方式不行,简单的反应循环或催化循环方式也不行,“能够进行这种整合的机制只能由超循环这类机制提供”^①。超循环是由催化循环构成的复杂循环。依靠这种机制,实现了把复制与变异、分解与合成、耦合与隔离、协同与竞争、稳定与不稳定统一起来,保证了最原始的翻译机构能够产生出来并得以进化。超循环论断言,自然界正是依靠这种机制渡过信息难关,积累起活细胞必需的巨大信息量。

^① 艾根、舒斯特:《超循环论》,58页,上海,上海译文出版社,1990。

建立复杂自组织的动力学方程至少目前是很困难的。较为有效的方法是计算机模拟。目前已有一些成功的工作。在给定环境中的大量实体相互作用，必然形成一种网络联系，因而可能用遗传回路的概念在计算机上进行模拟。相互作用的最简单方式是相互打开或关闭，在开开关关中寻找能够稳定下来的网络结构。圣塔菲学派的考夫曼用这种“两种输入信息”的网络模型进行研究，发现连接过分松弛的网络不会有稳定结构的自创生，连接太紧密的网络过度敏感，无法安定下来，也不可能出现有序结构。但如果处于中间情形，既有必要强度的连接，又不太紧密，网络就会经历一段过渡阶段而安定下来，形成稳定的、自我协调统一的结构。

以经济系统自创生为例。大量经济实体（个人、家庭、公司等）在现实社会环境中相互依存、竞争、合作，互动互应，不断学习，不断自我调整，最终形成稳定运行的整体，就是现实的经济系统。这种系统自创生可以在计算机的虚拟世界中进行模拟。以一定的微程序作为这些实体的代理作用体（agents），让大量的作用体群集于一定的环境中，彼此相互作用（或合作，或竞争，或既合作又竞争），开始形成某种较弱连接的网络。网络中的作用体可以通过交换部分“基因”（计算机密码）而发生突变，成为表现出不同行为的新代理作用体。网络中的作用体还与网络外的其他作用体相互作用，接受环境的评价与选择。这种内部的或外部的相互作用不断进行，最终形成某种能稳定运行的有机整体，就是新的经济系统。一个著名的模型叫做“阿斯彭”系统。这是一个虚拟的经济世界，由一万个虚拟家庭和1500个虚拟工厂、公司、银行、学校组成，可以模拟研究国家和特定行业的经济行为、不同货币和财政政策的影响等。每个代理作用体都能发生某些变化，可以有不同的行为，能够自行进化。如有的家庭强调价格便宜，有的家庭注重商品质量。管理者只设定初始环境和界限，让作用体

在互动互应中进化。设计者并未规定作用体之间要合作，但在自组织过程中，这些虚拟公司能像真的公司那样在形势困难时相互合作，共渡难关。当然，“阿斯彭”的规模还太小，与真实经济系统相距太远。专家们设想，如果能有一个包含 10 万个代理作用体的模型，就可能大大逼近真实系统的自组织。

7.7 自生长

最早按现代科学规范研究自组织的阿希贝认为，自组织有两种含义，一是组织的从无到有，二是组织的从差到好^①。一般来说，不能要求系统一经产生便很完善。自创生首先要解决从无到有的问题，然后才能解决从差到好的问题，即自我发育、自我完善、自我成熟。活系统尤其如此。最简单的自我完善是系统规模的增大，即系统组分的不断增加，叫做自生长。研究自生长是自组织理论的重要课题之一。

贝塔朗菲曾用微分方程描述系统的自生长。他讨论的是方程 (5.8)，即 $\dot{x} = f(x)$ 。展开为泰勒级数，并假定没有要素的“自然发生”，即绝对项为 0，因而得

$$\dot{x} = ax + bx^2 + \dots \quad (7.16)$$

忽略高次项，得到 (5.8) 的线性近似 (4.17)，它的解为

$$x = x_0 e^{at} \quad (7.17)$$

表示线性系统按指数规律生长，称为自然增长率，如图 4.5 所示。指数增长率在化学、生物、社会等方面均有应用。

指数增长律描述的是系统的无限生长，只能在小范围内近似反映真实情况。真实系统的自增长是非线性的，须考虑展开式

^① 参见贝塔朗菲：《一般系统论——基础、发展和应用》，90 页，北京，清华大学出版社，1987。

(7.16) 中的 2 次项方能逼近真实系统的自生长。此时方程的解为

$$x = \frac{ace^{at}}{1 - bce^{at}} \quad (7.18)$$

它反映的是系统的有限增长律,如图 5.2(c) 所示的 S 形曲线。化学中用它描述自动催化反应。在社会学中,所谓弗哈尔斯特定律用它来描述有限资源下的人口增长。

自然界有种类繁多的生长过程,服从不同的生长规律,须用不同的生长模型来描述。最简单的是许多物理系统呈现的结晶树枝状生长模式。如雪花(一般地,晶体)的形成,大气中灰尘凝聚成块状结构,水流中微粒凝聚成须状物等。这些现象可看作单纯的生长过程,只要出现基核或“种子”,就会逐步把周围某些微粒吸收聚集起来,形成宏观系统。但这类系统要么无法建立动力学方程,要么所建立的非线性方程无法得到解析解。兰热(J. S. Langer)基于对雪花形成过程热扩散的分析,并假定冻结核表面呈 S 形,建立了雪花形成的微分方程组,由于方程的非线性和基核表面的复杂性,很难用解析方法研究。计算机模拟方法是研究这种自增长的有效工具。已发现多种模型,一个著名的例子是有限扩散凝聚模型,简称 DLA 模型。

考虑 2 维系统(状态空间为格子化的平面区域)的 DLA 模型,其生长规律为

(1) 给定一个作为基核的粒子,位于格子的原点上;

(2) 在远离原点的格子点上放一个可以随机游走的粒子,有两种游走的可能结局:当它走到与基核相邻的格子时立即停止,表示与基核凝聚在一起,当它远离基核走向边界时,就取消这个粒子;

(3) 不论到达哪种结局,都把第三个粒子放在远离边界的格子上,让它随机游走,重新接受上述两种选择。

重复实行这种操作，即可形成如图 7.5 那样的凝聚体。它可看作真实凝聚体的平面影像，相当逼真地反映了这类系统通过自生长而逐步长大的过程。修改 DLA 规则，可得到其他生长模式。



图 7.5

生物的自生长是通过细胞的大量复制来实现的。其中，植物的生长规则比较单纯，可归纳为以下几点^①：

- (1) 破土而出的茎杆在一些叫做节的部位长出新枝；
- (2) 大多数新枝上又长出更新的枝，这种分枝行为反复进行；
- (3) 不同的枝彼此有相似性，整个植物有自相似结构。

植物可看作由大量枝、节组成的系统，可以根据以上三点建立模型，对植物生长作形式化描述。60 年代末，林登迈耶 (A. Lindenmayer) 把乔姆斯基的生成转换语法引入生物学，以简单的重写规则和分枝规则为基础，建立了关于植物的描述、分析和发育模拟的形式语法，称为 L-系统。

80 年代中，普鲁森科维奇 (P. Prusinkiewicz) 等人把 L-系统与计算机图形学、分形学结合起来，完善了植物生长的分枝模型。我们就最简单的情形加以说明。

设分枝化发生在 2 维平面上，每次分枝长出的均为单位长 l ，或者顺原枝方向延伸，或者旋转一定角度 α (如取 45°)。这样，图 7.6 中左边的植株就可以用中间的图形作为数学模型，在计算机上产生右边所示的植株。

^① 参见王东生、曹磊：《混沌、分形及其应用》，6.1 节，合肥，中国科学技术大学出版社，1995。

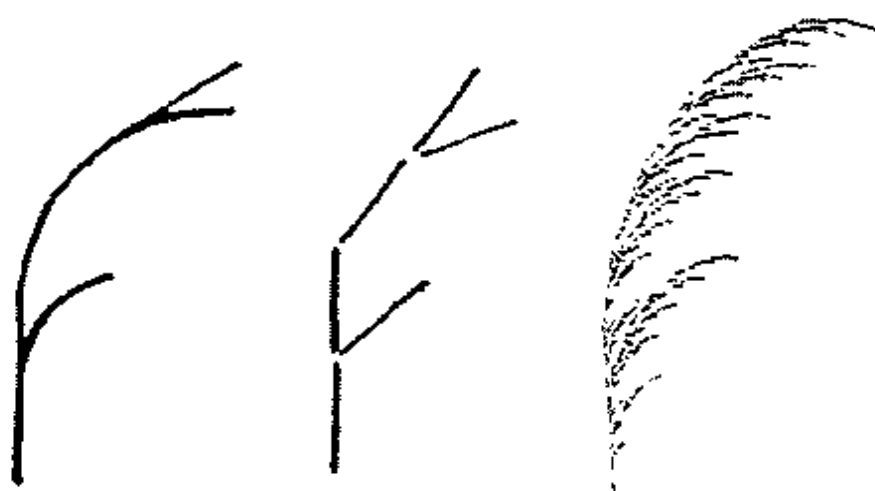


图 7.6

若以 $[$ 表示向右分枝，以 $($ 表示向左分枝，“ $[$ ”或“ $($ ”表示分枝开始，“ $]$ ”或“ $)$ ”表示分枝结束，就可以对植物生长规则（重写+分枝）作形式化的表达，使计算机能够理解。若图的生长规则的形式化表示为

- 1) $a \rightarrow d(c)b$
- 2) $b \rightarrow d[e]a$
- 3) $c \rightarrow b$
- 4) $d \rightarrow d$
- 5) $e \rightarrow d(a)b$ (7.19)

从“种子” a 开始，采取上述规则，得到以下发育序列

时间	结 构	所用规则
0	a	种子
1	$d(c)b$	规则 1
2	$d(b)d[e]a$	规则 4,3,2
3	$d(d[e]a)d[d(a)b]d(c)b$	规则 4,2,4,5,1
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮

在 2 维平面上，这个系统的生长过程的前三步如图 7.7 所示。

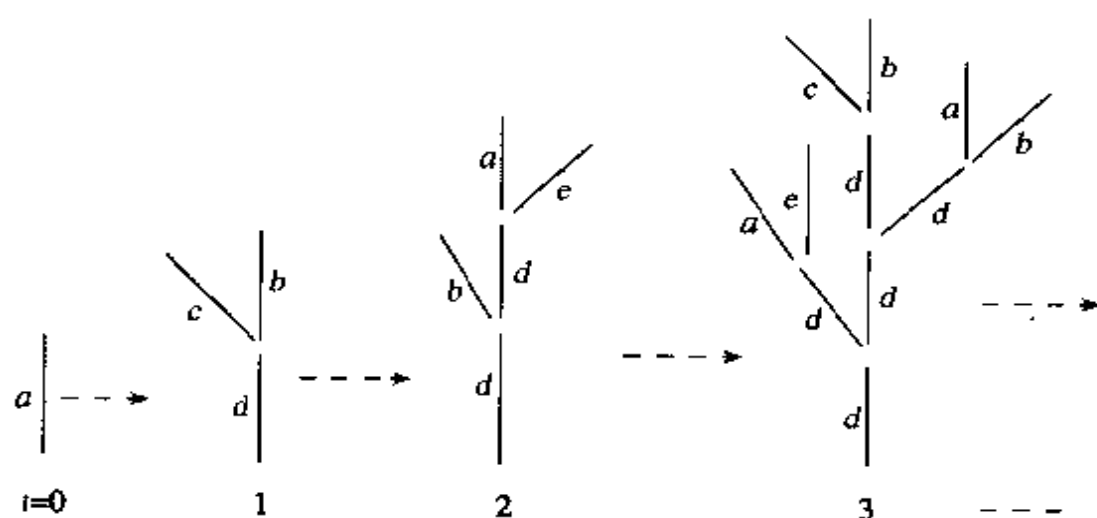


图 7.7

恰当规定生长规则，可作出如图 7.8 所示的植株。

真实的植株下粗上细，分枝下长上短，分枝角度也不尽相同，上述模型不能反映这些特点。但只要精细地规定生长规则，可以相当逼真的把这些特征表现出来，用计算机作出如图 7.9 所示的树木来（取自《混沌、分形及其应用》）。



图 7.8



图 7.9

7.8 自 适 应

适应与不适应是刻画系统与环境关系的概念。从外部看，适应意指系统与环境之间的物质、能量、信息交换是以一种稳定有序的方式进行的。从内部看，适应意指系统的组分之间以一种稳定有序的方式彼此合作与竞争、互动与互应。系统与环境进行稳定有序的交换，组分之间稳定有序地互动互应，这两方面互为因果。一旦这种稳定有序的方式被破坏，系统就处于不适应环境的状况，或者变革自身以重新适应环境，或者被迫解体。如果系统对环境的适应是靠自己的力量建立和维持的，就是自适应。

自适应有多种表现形式。最简单的自适应是自镇定。处于稳定状态标志着系统与环境相适应，干扰作用造成的瞬态表示系统与环境不适应，克服干扰使系统回到稳定态代表系统从不适应到适应的演化。但自镇定是一种平庸的自适应行为，线性系统也可以呈现这种自适应行为，且只能有这种自适应行为。

适应性是与不适应性比较而言的。系统原本适应于环境，由于环境的变化，或系统自身的变化，或两者都变化，导致系统与环境不再适应。起初系统只须作些调整（不涉及定性变化）即可恢复适应；变化到一定的阈值，系统只有抛弃原有的结构方案或行为模式，建立新的结构方案或行为模式，才能重新适应环境。这是自适应问题的典型提法。现在的自组织理论研究的大多属于此类问题：针对物理化学领域中的简单巨系统，特别是能用一个或少数几个状态变量描述的系统，以精确的数学模型和严格控制的实验手段研究系统如何通过改变结构去适应变化了的外部条件。就新结构的从无到有而言，它也是自创生。但这里不是把非系统的群体整合为系统，而是改变原系统的结构，称为自适应更准确。

一个著名的例子是贝纳德流。如图 7.10 所示，厚度为 h 的液

体由上下两块平板与环境隔开, h 比平板的尺度小得多, 理论上可

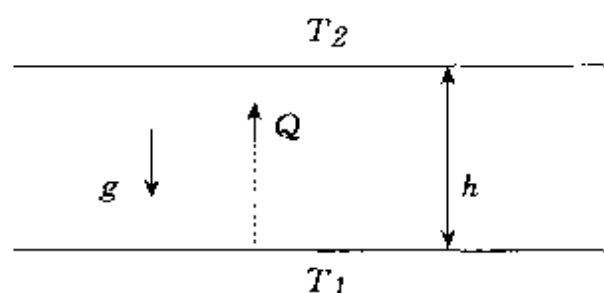


图 7.10

看作无限宽平板。起初, 平板上下温度相同, $T_1 = T_2$, 温差 $\Delta T = T_1 - T_2 = 0$, 系统处于处处均匀而宏观上静止的平衡态。这是一种稳定态, 表示系统与环境相适应。平衡态的特点是系统的组分之间只有分子半径范围的关联, 宏观尺度上液体分子处于无组织状态。现在开始从底部加热, $T_1 > T_2$, 液层上下出现非 0 的温差 ΔT 。液体完全保持原状态则不再适应环境, 但也无需大变, 只要出现从下到上的热传导 Q , 保持近平衡态, 系统与环境仍然适应。随着温差的加大, 热传导 Q 也加大, 但近平衡态可保持不变, 宏观上分子仍是无组织的, 运动图像没有定性性质的变化。温差代表环境压力。当温差即环境压力增大到某个临界值 $\Delta T = \Delta T_{c1}$ 时, 近平衡态本质上不再适应环境, 必须对液体分子进行宏观尺度上的组织, 建立全新的结构, 才能重新适应环境。这就是图 7.11 所示的结构, 称为贝纳德花纹。其中, (a) 是从上面看到的贝纳德花纹, 呈规则的六角形对流元胞, 尺度约 10^{-1}cm , 已属宏观构形。(b) 是从竖截剖面上观察到的贝纳德花纹, 每个元胞内的分子都被组织起来, 协调有序地从下到上按同一方向流动, 到达顶部的分子由于重力作用沿着圆胞边缘向下流动; 相邻元胞的分子按不同的方向流动, 若一个是左旋, 另一个必为右旋。这是一种稳定构形, 即耗散结构, 表示在温差到达临界值时, 只有按贝纳德花纹把分子在宏观尺度上组织起来, 系统才能与环境适应。如果继续加大温

差，液体仍可保持这种结构，只须作些量的调整，系统与环境还是适应的。但若温差增加到另一个临界值 $\Delta T = \Delta T_{c2}$ ，对流元胞式结构也不能适应环境压力，系统将出现新的相变，形成滚筒式的耗散结构，与环境达成新的适应。

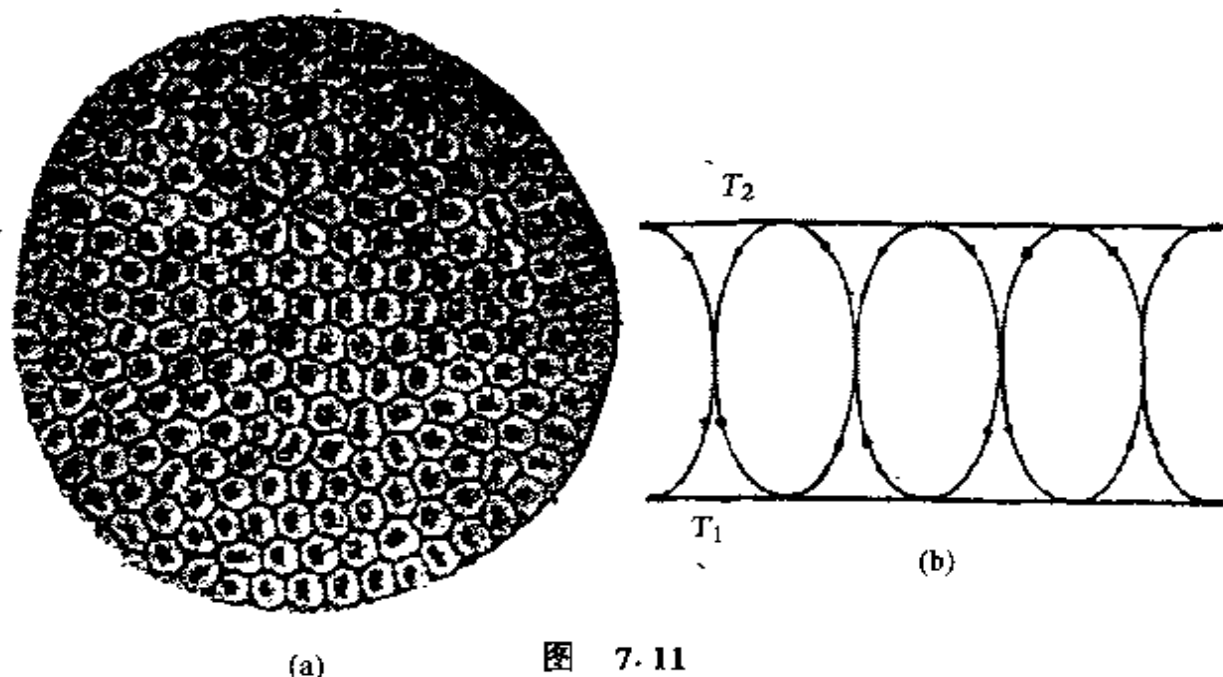


图 7.11

另一个著名的例子是激光。图 7.12 为一固体激光器的略图，由嵌有特殊原子的棒状材料构成，两端镶有两面镜子，并与一个提供能量的外泵源耦合。棒状材料中的原子受到输入能量的激发。输入能量为 0 时是热平衡态。当输入能量非 0 时，原子受激发产生电子轨道跃迁，就会发出光波。当输入能量小时，系统处于近平衡态，受激原子各自独立地发光，系统整体处于无序态，如图 7.13 (a) 所示，激光器相当于一个普通灯管。当输入能量（用输入功率 G 表示）达到某个临界值 G_{c1} 时，这种近平衡结构不再适应环境，系统将发生相变，受激原子采取合作行动，按同一方向发射光波，如图 7.13 (b) 所示，发出强大的激光。激光是一种远离平衡态的耗散结构，可与提供大能量输入的环境达成新的适应。继续加大能量输入到下一个临界值 G_{c2} ，激光结构也不再适应环

境，系统将又一次发生相变，建立脉冲光这种新的耗散结构，与环境达成新的适应。随着输入能量的进一步增加，将会出现新的临界点，用另一种耗散结构取代之，形成新的适应关系。

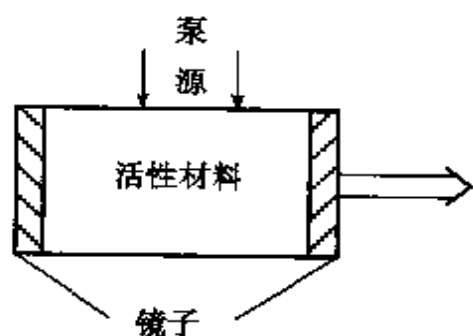


图 7.12

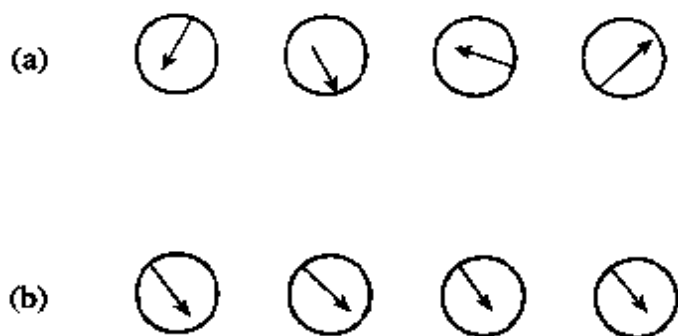


图 7.13

以上两例均为物理系统的自适应问题，可以用实验方法进行研究。温差 ΔT 和输入功率 G 是控制参量。这两个例子都是通过改变系统控制参量而引起的结构改变来考察自适应的。如果能建立系统的动力学方程，这种研究完全可以用数学方法进行。仍讨论激光系统。根据激光理论，受激原子的运动遵循场方程、原子偶极子方程和原子数反转方程，经过简化处理，得到以下方程

$$\dot{E} = (-k + G)E - \beta E^3 + F(t) \quad (7.20)$$

其中， E 为光场强度， $F(t)$ 为随机外作用力， k 、 G （输入功率）、 β 均为控制参量。抛开外作用项 $F(t)$ ，上式是(3.11)的一种特殊形式。上述以实验方法改变输入功率 G 对系统自适应的研究，可以转换为用非线性动力学方法在控制空间中研究当控制参量 G 变化时，系统如何分叉、突变、对称破缺选择，精确地计算出临界值 G_{c1} 、 G_{c2} 等。对贝纳德流随着控制参量的改变而出现的自适应演变也可作这种数学描述。一切能够写出动力学方程的系统，都可用这种方法研究其自适应行为。

以上两个例子表明：

(1) 当系统处于非临界点时, 对于环境压力 (控制参量) 的小变化, 系统无须改变其结构或行为模式, 只要作些小的调整即可保持与环境的适应; 但当环境压力增大到临界点时, 系统的原结构或模式不再适应环境, 须用全新的方式组织系统的元素, 建立新的结构或模式, 才能与环境达成新的适应。

(2) 在环境压力改变的全过程中, 系统的自适应演化不是一次, 而是一个系列, 即适应——不适应——新的适应——……。例如,

贝纳德流: 平衡态——→六角形对流元胞——→……

激光器: 噪声——→单频率相干振荡——→周期性脉冲——→……

一般模式: $\left[\begin{array}{c} \text{均匀无} \\ \text{序结构} \end{array} \right] \xrightarrow{\text{第一次失稳}} \left[\begin{array}{c} \text{有序} \\ \text{结构} \end{array} \right] \xrightarrow{\text{第二次失稳}} \left[\begin{array}{c} \text{更有序} \\ \text{的结构} \end{array} \right] \longrightarrow \dots$

上面讨论的系统都是组分不变, 适应性演化表现为随着控制参量的变化而改变系统结构。在另外的情形下, 适应性演化是由系统自身的变化引起的, 如系统的组分数量显著增大, 原有的结构不再适应环境, 导致系统改变自己的结构。这是哈肯所说的第二种自组织。

当系统有多个稳定定态 (吸引子) 共存时, 瞬时干扰把系统推向哪个吸引域, 就会出现向该吸引子演化的自适应运动。这是哈肯所说的第三种自组织。

复杂的自适应现象同时包含学习、生长、复制、创新等操作, 需要运用计算机模拟来研究。适应的基本机制之一是系统通过与环境互动而积累经验 (也是一种自生长), 去修正和重组基本单元。霍兰德的遗传算法 (GA), 又称基因算法^①, 提供了理解这种机制

^① John H. Holland: 《基因算法》, 载《科学》(重庆), 1992 (11)。

的计算机模型。遗传算法是一种类似于生物进化的自然选择机制的计算机程序，可通过进化与自然选择获得解决复杂问题的能力。它需要建立一种能够表示任何计算机程序的基因码，使得程序基因型（组成程序的数位）中的任何变化，都能引起程序表现型（程序所干的事情）发生质的变化。霍兰德为此设计了由一套规则组成的分类者系统，分类者是由 0、1 两个数组成的数位串，如 100101011，011001100 等。其中每一数位都与该规则的输入和输出是否具有某种特征相对应（1 代表具有某个特征，0 代表不具有该特征），以区分众多的处理对象。改变数位串中的任何数位，就改变了程序的行为。遗传算法的关键就是处理这些数位串。生物产生新基因的方法是组配（两个配子相遇而交换染色体，生成一种结合子）与突变，遗传算法能模拟这两种机制。图 7.14 所示为

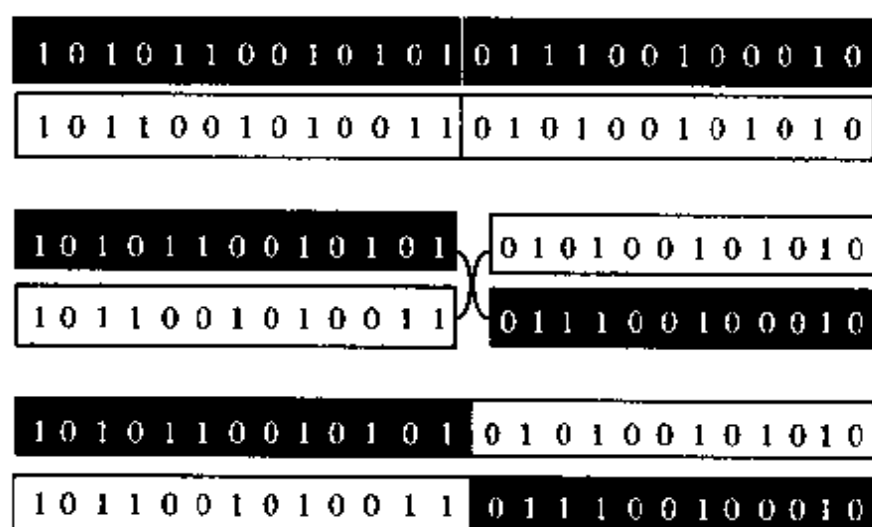


图 7.14

两个程序通过交换部分基因码而进行基因重组的机制，与真正的有机体基因重组的机制相同。把两个串并排起来，沿左右方向任取一点，交换两串的左边部分，产生两个后代，一个后代包含第一个串在交换点左边的符号和第二个串在交换点右边的符号，另一个后代包含第一个串在交换点右边的符号和第二个串在交换点左边的符号。基因算法也通过突变的办法改造少部分数位串，以

保证不产生不能继续进化的单一群体。

遗传基因操作器包含交换、反演、突变。遗传算法通过把基因操作器应用于种群中最成功的表现型所对应的基因型而产生变体。此算法的要点如下：

(1) 依据表现型的成功程度选择基因型对，表现型越成功，它的基因型越可能被选择；

(2) 应用基因操作器于所选择的基因型对，创造“子代”基因型；

(3) 以第二步产生的子代取代最不成功的基因型。

用一个随机选择的分类者去启动系统，使作用体四处游荡(随机游荡)，在行动中学习，积累经验，接受环境的评价和选择，经受优胜劣汰的磨练，如此一代一代的发展下去，那些最终能够圆满解决问题的数位串将占据优势。当然，目前基因算法的运行规模还远远小于生物进化，但已有许多成功的应用，所提出的模型表现了与自然界的共生、寄生、生物的“军备竞赛”、拟态、形成小生境、物种产生等现象相类似的特征，在自组织研究中显示了诱人的前景。

7.9 自复制

系统在没有特定外作用下产生与自身结构相同的子代，叫做自复制或自繁殖，是生命现象最为奥妙的特性之一。揭示自复制的机制是自组织理论的另一基本课题。稍微复杂的自生长和自适应均包含某种自复制。L-系统理论中的重写规则就是一种平庸的自复制。遗传算法代表一种描述如何从双亲产生子代的特定算法，也包含自复制操作。

研究自复制更有效的手段是细胞自动机(CA)。40年代末，计算机之父冯·诺伊曼提出要从理论上阐明机器能否复制(即是否有能够自动构造自身复制品的机器)，奠定了自动机的数理基础。他的用意不是制造一个真实的机器，而是创造一个模型系统；所谓“细胞”，指系统

的基本单元,所谓“机”,指 CA 中非静止细胞的一个有限集。

与 L-系统、GA 一样,CA 也是一种递归算法,反复使用一组简单的规则于全域(universe)中的细胞,以产生某种结构。其特点为

(1) 离散化:空间离散化,全域被分为许多格子(对于 2 维细胞自动机,格子为正方形,或三角形,或六角形),呈网格状,细胞处于离散的位置(格点)上;时间离散化,在每一时步所有格点上的状态都可以发生同步变化;状态离散化,细胞只有有限个可能状态。CA 是一种离散系统,因而又称为点格自动机。

(2) 演化规则:CA 是动力学系统,在每一时步上,格点或细胞按一定规则更新或转移它的状态;更新规则通常是确定性的,用转移函数描述;规则是局部的、近距离的,格点上状态的变化只依赖于邻近格点和自身的状态。

不同的格子,不同的状态集,不同的转移规则,构成不同的细胞自动机。最简单的是两个状态(如左或右,大或小,白或黑,等等),可用 0(关)和 1(开)作数字化表示。对于 1 维系统,转移规则可取

$$C_i(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{若 } C_{i-1}(t) + C_{i+1}(t) \text{ 为奇数} \\ 0, & \text{若 } C_{i-1}(t) + C_{i+1}(t) \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7.21)$$

这表示在时刻 t 相邻格子的数目之和为奇数的格子,在 $t+1$ 时刻将把自己的状态变为 1,相邻格子数目之和为偶数的那些格子,在 $t+1$ 时刻将把自己的状态变为 0。具体表示为

$$0+1=1+0=1, \quad 0+0=1+1=0 \quad (7.22)$$

此式表明细胞之间的作用是非线性的。

70 年代以来,细胞自动机有了长足发展。1970 年,肯威(Cunwey)提出一个叫做“生命游戏”的自动机模型。“生命”在一个长方形格子上运转,格子中的细胞或死或活。如果一个细胞死亡,但恰好有三个活的邻居,它将在下一时刻重新得到生命。如果一

个细胞活着，仅当它有两个或者三个活邻居时才能继续活着。经证明，这个系统有自复制能力，给定适当的初始条件，它能模拟任何可能的计算机。

1984 年，理论物理学家沃夫拉姆 (S. Wolfram) 引入物理学和计算机科学的方法研究细胞自动机的演化。他以细胞自动机作为连续动力学系统的离散逼近，引入熵等热力学量来描述系统行为；又把细胞自动机刻划为产生语言的机器，去生成与不同复杂水平的规范语法规则相一致的模式。沃夫拉姆发现，细胞自动机作为一类动力学系统，有四种吸引子态。

I 型：不动点，代表均匀定态。

II 型：周期吸引子，代表周期运动。

III 型：混沌吸引子，代表貌似无规的确定性运动。

IV 型：一种动力学理论直到当时尚未发现的新定态。80 年代末，朗顿等人发现，这就是一种处于“混沌边缘”的定态，即圣塔菲学派所讲的“复杂性”。

一个有趣而最简单的例子是朗顿用细胞自动机构造的能自我复制的“圈”，如图 7.15 所示。每个细胞有 8 个可能状态 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7。按一定的规则经过 151 步演化，可得到图 7.16 所示的两个圈，表明初始构形成功地复制了自己。^①

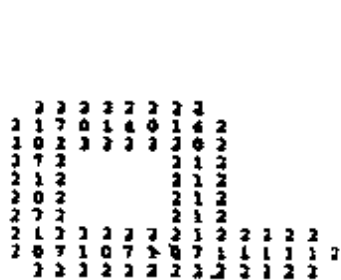


图 7.15

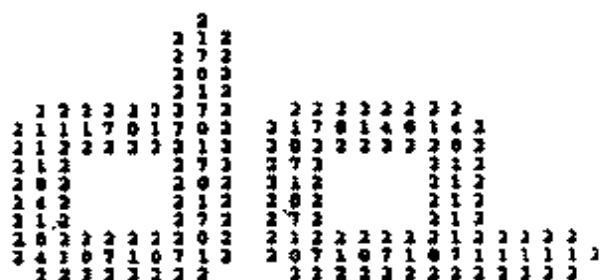


图 7.16

^① C. Langton; Artificial Life, p. 29, New York, Addison-Wesley, 1989。或参考谭跃进、高世楫、周曼殊：《系统学原理》，7.3 节，长沙，国防科技大学出版社，1996。

以上是确定型细胞自动机模型，每次使用相同的结果。如果加进随机成分，在几种可能性中随机地作出选择，就得到随机型细胞自动机模型，可以模拟更复杂的自复制现象。

思 考 题

1. 自组织的基本特征是什么？
2. 自发性在事物发展中有何积极意义？如何辩证地理解自发性与自觉性的相互关系？
3. 自组织理论是怎样把必然性与偶然性、确定性与随机性统一起来的？
4. 阐明非线性相互作用和反馈机制在自组织过程中的作用。
5. 试析耗散结构论、协同学、超循环论对于分析复杂自组织过程的局限性。

阅 读 书 目

1. H. 哈肯：《协同学：大自然构成的奥秘》，戴钟鸣译本，上海，上海科学普及出版社，1988；凌复华译本，上海，上海译文出版社，1995。
2. 苗东升：《系统科学原理》，第12～15章。
3. 苗东升：《系统科学辩证法》，第5～8章。
4. 沈小峰、吴彤、曾国屏：《自组织的哲学——一种新的自然观和科学观》，北京，中共中央党校出版社，1993。
5. 曾国屏：《自组织的自然观》，北京，北京大学出版社，1996。

第 8 章 他组织系统理论

在系统学中，自组织理论与他组织理论是两个相互补充的部分，二者缺一不可。理论自然科学已从不同方面研究过他组织问题，虽有很多成果，尚不能简单地移入系统学。仿生学、设计理论、管理科学等都是研究他组织问题的技术科学，积累了丰富的材料，也不能简单地算作系统科学的内容，更不能当作系统学。控制学、运筹学等属于系统科学中技术科学层次的他组织理论，钱学森于 70 年代末、80 年代初多次提到的理论控制论、理论运筹学和理论事理学应属于基础科学层次的他组织系统理论，它们的任务是更集中地研究系统运筹、决策和控制的共性问题。但迄今尚没有一种可以同自组织理论相比的他组织理论。本章的任务是提出这一学科建制，介绍一些重要内容，探讨建立他组织系统理论的条件和途径，并不试图给出它的概念框架。

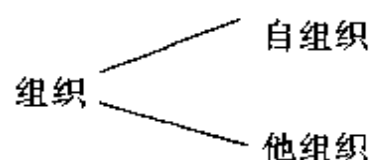
8.1 组织 自组织 他组织

组织是现代科学各个领域广泛使用的概念。尤其在系统科学中，组织是少数最基本的概念之一。揭示从自然界到人类社会的各种组织如何产生、生长、维持、演化、管理的机理，是现代系统研究前沿的中心课题。随着系统科学的不断发展，我们对组织概念的理解愈益深入全面，但仍有许多基本问题有待探讨。

在系统科学及相关学科文献中，常常把组织与自组织看作

一对矛盾概念，相比较地对二者加以界定。如哈肯的协同学就是这样的。把自组织作为组织的反面隐含着一个判断：自组织不是组织，而是非组织。这显然不正确，自组织当然是一种组织，但组织不一定是自组织。为克服此一逻辑毛病，有的学者提议把组织改为有组织。但把自组织与有组织作为一对矛盾概念，隐含着另一个判断：自组织不是有组织，而是无组织。这同样有逻辑毛病，自组织必定是有组织的，有组织的未必是自组织。自组织可作为名词，有组织不可能作名词使用，可以讲“这是一种自组织”，不可以讲“这是一种有组织”。有人提议用“被组织”代替“组织”，也不妥。与有组织相同，被组织也是形容词或动词，不是名词，不能表示实体。讲“生物体是自组织”，通；讲“机器是被组织”，不大符合汉语习惯。

从逻辑上看，组织是属概念，自组织是它下面的种概念之一。与自组织 (self-organization) 相对应的另一个种概念是非自组织，或称他组织 (英文拟为 heter-organization)。因而有



这样界定的组织、自组织、他组织三个术语都既是名词，可以表示某个实体或系统，也可以作为动词，表示某种过程或操作，与系统科学的习惯用法一致。

自组织与他组织都是组织的真子类。作为实体，两类对象都是组织起来的群体，即有组织的群体，区别在于组织力或组织指令来自群体内部，还是来自群体外部。组织力来自系统内部的是自组织，组织力来自系统外部的是他组织。按哈肯的表述：“如果系统在获得空间的、时间的或功能的结构过程中，没有外界的特定制约，我们便说系统是自组织的。这里的‘特定’一词是指，那种结构和功能并非外界强加给系统的，而且外界是以非特定的方

式作用于系统的。”^①例如激光，在阈值前后只有输入功率大小的不同，没有加入任何有关原子如何协同行动的指令，协同现象完全是自发出现的，是系统的自组织行为。

类似地，如果系统是在外界的特定干预下获得空间的、时间的或功能的结构的，我们便说系统是他组织的。“外界的特定干预”就是他组织作用。机器是人按照特定的方式设计制造的，绵羊“多利”是英国科学家用克隆技术人工复制出来的，都是他组织。他组织过程是自上而下进行的，具有某种强制性，自觉性是人工他组织的特点。

就整个自然界及其发展史来看，自组织是基本的，他组织是在宇宙自创生后的发育进化过程中逐步出现的。当自然界沿着不断增加复杂性的方向进化到一定阶段，为对付不断增加的复杂性，需要分出不同层次，或分为中心部分与非中心部分，便产生了他组织。高层次对低层次，中心部分对非中心部分，必有某种他组织作用。最典型的他组织是人工设计、制造、操纵、控制的系统。因此，他组织的存在也十分广泛。特别地，人造事物都是他组织系统，人工创造任何事物的过程都是他组织过程。有关他组织的研究，主要是对人工物的研究。

8.2 他组织原理

根据组织力的特点，他组织有三种类型：

(1) 指令式，他组织力是强制性的，系统运行的一切步骤、细节均为外部组织力严格规定，如指令性计划，行政系统上级对下级的命令，地面监控系统对卫星定位的控制等；

(2) 诱导式，组织力不是强制性的，而是指导（或引导或诱

^① 哈肯：《信息与自组织》，29页，成都，四川教育出版社，1988。

导)式的,如指导性计划,政策性引导,启发式教育等;

(3) 限定边界条件式,不许系统运行超出设定的边界,只要在边界范围内,系统完全是自治的,如中央对香港事务的管理,政府通过企业法、劳动法等对企业的规范等。

根据设计和运行原理,人工他组织系统分为仿自组织的与非仿自组织的两类。自然界存在的任何自组织系统,人类一旦认识了它的结构原理或运行机制,迟早要仿制出某种类似物,要它提供特定的功能服务。最典型的自组织系统是生物机体,仿照生物机体的自组织原理设计器件,是人工他组织系统设计思想的重要来源。仿生学及其在工程技术中的应用已有大量成果,应据之提炼设计制造他组织系统的仿自组织原理。

仿照自然界的自组织系统(原型)建造人工系统时,可以使用与原型相同的构筑材料和结构方案,也可以使用完全不同的构筑材料和结构方案,只要获得与原型系统相同或相近的功能即可。这就是所谓功能模拟方法,在技术科学和工程技术中已有长足的发展。目前人类掌握的构筑材料基本限于物理化学材料,仿照生物自组织的他组织主要着眼于功能模拟,结构和运行原理在某些方面近似、甚至完全不同于生物自组织。典型的例子之一是电脑这种他组织系统。用电子器件制造的计算机,不论是早期的串行式还是近来发展的并行式,其基本构件和工作原理都不同于人脑。最近名为“深蓝”的电脑战胜国际象棋大师卡斯帕洛夫的事实表明,人脑的许多功能,特别是逻辑推理、计算,可以用构造完全不同于人脑的系统来模仿。电脑的发展可以走模拟人脑的道路,也可以走别的道路。

原则上说,每一种自组织方式均有对应于它的他组织方式,人们在自然界发现的一切自组织方式,迟早要通过人工仿制而形成相应的他组织方式。有系统的自产生,就有系统的人工设计和制造。有系统的自发育,就有系统的人工培育,如人工育种、培养

接班人等。有系统的自镇定，就有人工从外部镇定系统，如意大利当局为防止比萨斜塔的倾倒所采取的举措，又如 40 年代美国政府为防止蒋介石政权被中国人民推翻所实施的种种干涉中国内政的行动。有系统的自修复，就有他修复，如工人维修机器、医生治疗病人等。有系统的自繁殖，就有人工的他繁殖，如复印书报、克隆动物等。生命过程和化学过程包含大量自催化现象，化学试验和化工生产过程中依靠从外部加入催化剂而完成的催化作用，是他催化。学习也有两种，一种是自学习，即无教师的学习；另一种是有教师的学习，即学习活动中的他组织。对于一切仿自组织的他组织系统，自组织理论的原理和方法都有用武之地。

大量的他组织系统是非仿自组织的人工创造物，在自然界没有对应物。人不能从自然界直接获得这种系统的设计思想。绝大部分机器都是这种人工系统。但不能说它们一定是违背自然的。实际上，今天的自然界是从它的起始点经过漫长的历史过程发展而来的，经历了无数次分叉、突变、锁定，在每个分叉点上都发生过对称破缺选择，某一种可能性被选择、锁定，其余的可能性就被淘汰。只要人类认识了物质世界的客观规律，就可以创造出那些在现实世界没有对应物、却是这个世界本来可能有的、但在它的历史发展的某个时刻被对称破缺选择淘汰了的存在物。另一种可能是，某些物质系统要在诸多条件聚集齐备时才能产生，但自然界靠随机性把这些条件聚集齐备的概率极其微小，致使这种系统很难自然而然地产生出来；当人类认识了自然规律后，人为地促使这些条件聚集齐备，就可以把它们创造出来，人类的理性还可能避免自然界盲目的自组织过程大量多余的曲折。不论哪种情况，符合物质世界运动规律是设计和操作人工他组织系统最根本的原则。自组织原理在这里仍起作用。医生治病的各种措施须在患者体内生物学自组织过程的基础上发挥作用。都江堰是李冰父子领导古代民工修建的他组织系统，但该系统须在当地水系自身

运行规律的基础上因势利导地设计和改造，才能有效地运行，其中包含水系自身的某种自组织因素。

从哲学上讲，自组织与他组织是一对矛盾，相互排斥又相互依存。他组织运动实质上建立在自组织运动之上，是在自组织运动的基础上发展出来的。自行组织起来的宇宙逐步产生出他组织，表明自组织需要他组织，自组织与他组织相结合，方能产生更高级的组织形态。在自然界自发进化出来的系统中，只要有等级层次划分（中心与边缘的划分是一种特殊的层次划分），上层对下层就有一定的他组织作用。高等动物的中枢神经系统对其他系统有他组织作用。但不论由人工力还是自然力造成的他组织系统，只要是物质的，都要遵循物质运动规律。一个人工系统一旦被创造出来，就有它自己的运动规律，即某种自组织运动。工程上的自动器是人造的他组织系统，但一经投入运行便能够自动地根据环境的某些变化重新组织自己的运动，即自组织运动。非自动器的人工装置也不是完全的他组织，因为外部作用力只有转化为系统内部的运动，通过系统组分之间的相互作用才能起作用，他组织力要通过自组织力来起作用。对于克隆动物，在母体内按生物自组织机制孕育（“借腹怀胎”）极为重要。

哈肯指出：“显然，自组织系统与人工装置之间的分界线并非严格的。在人工装置中，人设定的某些边界条件使组分的自组织成为可能；在生物系统中，一系列自我设定（self-imposed）的条件允许并指导着自组织。”^①哈肯常把激光器看作处于自组织与他组织边界上的系统，因为尽管在控制参量达到相变阈值时原子之间的协同动作是自行组织起来的，但控制参量到达阈值是人工控制的。所谓市场经济，在市场这个中观层次上是高度自组织的，在参与市场竞争的每个企业内部却是高度计划管理的，职工的行为

^① H. Haken: Advanced Synergetics, p. VII, Springer-Verlag, 1983.

受到强制式的他组织力支配。社会系统都是自组织与他组织的某种统一。就地方系统看，中央的命令是他组织指令，若就整个国家而言，又是自组织的，中央是这个整系统的一个子系统。在纯粹的自然系统中，上层对下层的组织力对子系统是他组织力，对整系统是自组织力。单纯作为自组织系统，或单纯作用他组织系统，都不能充分认识社会运动。

西蒙的名著《人工科学》是讨论他组织问题的，包含丰富的他组织原理，如关于有限理性原则的论述。在国内，李伯聪的《人工论提纲》对他组织作了哲学分析。

8.3 他组织系统的动力学方程

他组织过程也是动力学过程。一个他组织系统若能用动力学方程描述，必定为非齐次方程，方程中包含代表他组织力的外作用项（驱动项或受迫项）。连续他组织系统动力学方程的一般形式为

$$\dot{X}=G(X)+F(t) \quad (8.1)$$

X 为状态向量， $F(t)$ 为他组织力。这个方程可以描述一大类不同系统。对于化学反应， F 是反应浓度的函数。对于心脏系统， F 是起搏器施加的周期外作用力。在群体动力学中， F 可能是食物供应量。在社会系统中， F 可能是上级的指令。

对于这类方程，经典动力学、现代非线性动力学等学科在强迫运动的题目下已有大量研究，为建立他组织系统理论提供了丰富的材料。一个著名的例子是以杜芬方程

$$\ddot{x}+k\dot{x}+x^3=B\cos\omega t \quad (8.2)$$

描述的二阶非线性系统，外作用项为时间 t 的余弦函数（幅值为 B ，频率为 ω ）， $k\dot{x}$ 是阻尼项。令 $y=\dot{x}$ ，以 x 、 y 为状态变量，杜芬方程可表示为一阶联立方程组

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -ky - x^3 + B\cos\omega t\end{aligned}\quad (8.3)$$

若记

$$X = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, G(X) = \begin{pmatrix} y \\ -ky - x^3 \end{pmatrix}, F(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ B\cos\omega t \end{pmatrix} \quad (8.4)$$

杜芬方程就取得 (8.1) 所示向量形式。

另一个著名的例子是范德坡方程

$$x + a(x^2 - 1)\dot{x} + \omega_0 x = A\sin\omega t \quad (8.5)$$

描述的二阶非线性系统。对于瑞利 1896 年提出的这个方程，范德坡在本世纪 20 年代就电路系统作了深入的理论和实验研究，在动力学发展史中占有重要地位。但 80 年代以来，人们用新的观点重新研究范德坡方程和杜芬方程，发现以往对它们的了解十分有限，这些系统都有异常丰富多样的动态行为，过去的研究只限于很窄的参数范围而未发现。围绕这两个方程的研究大大丰富了非线性动力学，对于建立系统学的他组织理论颇具价值。

可以把他组织系统转化为自组织系统来研究。动力学早就从数学上讨论过这个问题。在杜芬方程中，令 $x_1 = x$, $x_2 = y$ ，把时间 t 作为第三个状态变量，即 $x_3 = t$ 。得到以下与方程 (8.3) 等价的 3 维系统

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_1^3 - kx_2 + B\cos\omega x_3 \\ \dot{x}_3 &= 1\end{aligned}\quad (8.6)$$

就是说，一个 2 维的他组织系统，如果把时间 t 作为另一维，在 3 维空间中就成为自组织系统。一般地，一个 n 维他组织系统，若把时间 t 作为新的状态变量，就转化为 $n+1$ 维空间中的自组织系统。如果以适当的办法减少 1 维，就可能把自组织系统变为他组织系统。

哈肯以另一种方式讨论过自组织与他组织的相互转化。他组

织的特点是因果界限绝对分明，他组织作用项 $F(t)$ 只是原因，不是结果，不遵从系统的动力学方程；状态变化只是他组织作用的结果，不会成为 $F(t)$ 变化的原因。这实际上是对现实的一种简化处理。最简单的情形是只有一个状态变量 x 和一个外力 $F(t)$ 的系统。为保证 $F=0$ 时系统是稳定的，要求系统有阻尼，即满足条件

$$\dot{x} = -\gamma x \quad (8.7)$$

其中， $\gamma > 0$ 是阻尼系数。加入外作用力 F 得到他组织系统的方程

$$\dot{x} = -\gamma x + F(t) \quad (8.8)$$

为进一步讨论，取一种特定的他组织作用

$$F(t) = k e^{-\gamma_1 t} \quad (8.9)$$

其中， γ_1 可正可负。(8.9) 满足

$$\dot{F} = -\gamma_1 F \quad (8.10)$$

取“绝热近似”假设，即假定系统的时间常数 $T_0 = 1/\gamma$ 远小于外作用力的时间常数 $T = 1/\gamma_1$ 。这意味着系统的过渡过程十分短暂，可以略去不计，只考虑定态 $\dot{x} = 0$ 。即

$$0 = -\gamma x + F(t) \quad (8.11)$$

由此求得

$$x = \gamma^{-1} F(t) \quad (8.12)$$

此式表明，系统的终态（定态）完全由外力决定。这正是他组织的特点。

但在实际情形下，他组织力 $F(t)$ 与系统的状态变量或多或少是相互作用的，原因与结果的界限并非绝对分明。在社会系统中，上级不仅向下级发出指令，也受到下级的作用，根据下级的行为或反馈信息修改指令。“载舟之水也覆舟”，说的就是被领导者对领导者的巨大反作用。在高等动物机体中，中枢神经不仅控制其他系统，也受其他系统运行状况的影响。对卫星的控制作用要依据卫星实际运行状态的反馈信息加以调整。这些都反映他组织力

$F(t)$ 受系统行为结果的影响,即受系统动态规律的影响,并非完全独立于系统而变化的。方程(8.1)及其特例(8.8)是忽略了 X 的变化对 $F(t)$ 的影响而得到的。哈肯指出,“为描述自组织现象显然要把外力作为整个系统的一部分”,“要把它们作为遵从运动方程的量”^①。如果能以数学形式表示这种影响,即表示 $F(t)$ 如何遵从动力学方程,就可以把他组织方程变为自组织方程。

令 x_1 记 $F(t)$,仍取特定形式(8.9), x_2 代表原状态变量,阻尼系数记为 γ_2 。他组织系统(8.8)可表示为

$$\dot{x}_1 = -\gamma_1 x_1 \quad (8.13)$$

$$\dot{x}_2 = -\gamma_2 x_2 + x_1 \quad (8.14)$$

这是在(8.13)中忽略了 x_1 与 x_2 之间的相互作用项 $h(x_1, x_2)$ 的结果。把这一项考虑进去,例如取 $h(x_1, x_2) = ax_1 x_2$,得到

$$\dot{x}_1 = -\gamma_1 x_1 + ax_1 x_2 \quad (8.15)$$

$$\dot{x}_2 = -\gamma_2 x_2 + x_1 \quad (8.16)$$

更一般地应是

$$\dot{x}_1 = -\gamma_1 x_1 + h(x_1, x_2) \quad (8.17)$$

$$\dot{x}_2 = -\gamma_2 x_2 + k(x_1) \quad (8.18)$$

[哈肯取 $k(x_1) = bx_1^2$]。只要这两个联立方程有稳定定态解,就代表一个自组织系统。仍取“绝热近似”假设,即

$$\gamma_2 \gg \gamma_1 \quad (8.19)$$

可利用 $\dot{x}_2 = 0$ 近似地求解(8.16),得

$$x_2(t) \cong \gamma_2^{-1} x_1(t) \quad (8.20)$$

用协同学的语言讲, x_1 是序参量,支配 x_2 的变化,(8.20)表明系统(8.16)立即追随系统(8.15),故称系统(8.16)受(8.15)役使。(8.12)与(8.20)实质是一回事。在他组织中外

① H. 哈肯:《协同学导论》,245页,北京,原子能出版社,1984。

部组织力起支配作用，在自组织中序参量起支配作用，二者有某种本质的联系；当把他组织转变为自组织时，外力就变成序参量，当把自组织转变为他组织时〔忽略 $h(x_1, x_2)$ 〕，序参量就变为外力。这表明，哈肯所谓可以对自组织与人工系统作统一的理论描述的意见是有道理的。

控制科学是迄今发展最为充分的一门他组织理论，并且一开始就是作为系统科学的分支学科而发展的。控制作用是他组织力，又称为输入变量。控制科学着眼于输入-输出关系，处理方法有所不同。我们仍采用第3章的记法， u 为控制作用， x 为状态变量， y 为输出变量。在状态空间中，动态系统的运行演化可以更细致地划分为两种过程：输入或初态引起的系统状态变化为动力学过程，状态和输入引起的输出变化常看作静力学过程。从结构看，动态系统可用方框图表示为

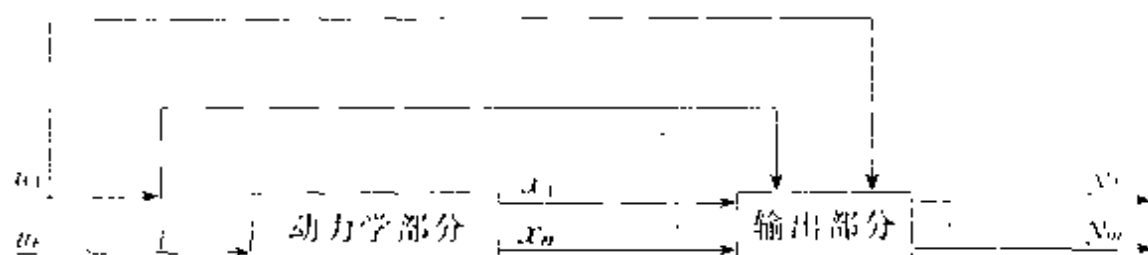


图 8.1

若采用向量形式，可简单表示为

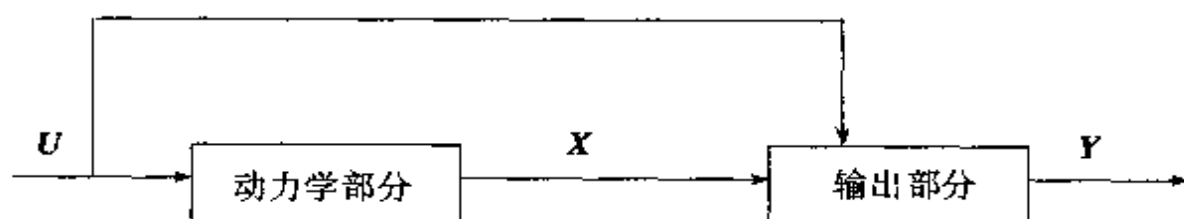


图 8.2

系统的动力学部分用动态方程描述，静力学部分用输出响应函数刻画，二者一起构成系统的状态空间描述。对于线性控制系

统，状态空间描述的一般形式为

$$\dot{X} = AX + BU \quad (\text{状态方程}) \quad (8.21a)$$

$$Y = CX + DU \quad (\text{输出方程}) \quad (8.21b)$$

其中， A 、 B 、 C 、 D 为常系数矩阵

$$\begin{aligned} A &= (a_{ij})_{nn} & B &= (b_{ij})_{nk} \\ C &= (c_{ij})_{ln} & D &= (d_{ij})_{lk} \end{aligned} \quad (8.22)$$

DU 一项代表输出对输入的直接响应。在许多情形下，这种直接作用可以忽略不计，输出只对状态变量作出响应，即 $D=0$ 。相应的状态空间描述为

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (8.23)$$

对于变系数线性控制系统，系数矩阵的元素为时间 t 的函数，记作 $A(t)$ 、 $B(t)$ 、 $C(t)$ 、 $D(t)$ ，状态空间描述的一般形式相同，写作

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(t)X + B(t)U \\ Y &= C(t)X + D(t)U \end{aligned} \quad (8.24)$$

哈肯曾“用黑格尔的哲学语言”讨论自组织与他组织之间既对立又合作的辩证关系，进而论述协同学与控制学的辩证关系。“一方面在控制论中，大部分构造的系统都有一个目的，外界以一种特定的或者说明确的方式对系统施加控制。我们可以把这种控制称为硬控制、直接控制或者确定控制，通过这种控制，系统实现既定的目的。另一方面，协同学所指的控制是一种软控制、间接控制或者说不确定控制。”^①他认为，可以用统一的观点研究自然界的自组织和人工装置，在自组织与控制之间找寻一种适当的合成或平衡。“就现阶段来说，协同学可以说是一门关于自组织的理论。但作为协同学未来的发展途径之一，我们可以将系统中的

① H. 哈肯：《协同学——理论与应用》，233 页，北京，中国科学技术出版社，1990。

组织与自组织及其间的相互作用加以综合考虑。”^① 这个思想对于系统科学的发展是重要的。

8.4 他组织系统的动力学特性

他组织系统 (8.1) 的动力学特性由两种因素决定：一是他组织作用 $F(t)$ 的特性，二是当 $F(t)=0$ 时自由系统

$$\dot{X}=G(X) \quad (8.25)$$

的动力学特性。我们把 $G(X)$ 为线性函数的 (8.1) 称为线性他组织系统， $G(X)$ 为非线性函数的 (8.1) 称为非线性他组织系统。通常从两方面考察他组织系统，一是在初始条件为 0 时考察系统对他组织作用的响应特性，称为零初值响应，或强迫响应；一是在他组织作用为 0 的条件下考察系统对初值扰动的响应特性，称为零输入响应，或自由响应。

对于线性他组织系统，可以求得闭式解。线性状态方程 (8.21a) 的解为

$$X(t)=e^{A(t-t_0)}X(t_0)+\int_{t_0}^te^{A(t-\tau)}BU(\tau)d\tau \quad (8.26)$$

其中， $e^{A(t-t_0)}X(t_0)$ 为自由响应， $\int_{t_0}^te^{A(t-\tau)}BU(\tau)d\tau$ 为强迫响应。

线性他组织系统的运动特性主要由他组织作用决定。如果 F 为 t 的线性函数，他组织系统仍然是平庸的。如前节所说，当外作用项 F 为 t 的非线性函数时，在把 t 也作为状态量的 $n+1$ 维空间中，系统成为非线性的。由于他组织作用的非线性，这个系统将出现线性自治系统不可能有的行为。例如，阻尼强迫线性振子

$$\ddot{x}+3.2\dot{x}+256x=256\sin t \quad (8.27)$$

在零输入时（自由运动）只有平衡运动。但由于有正弦输入作用的驱动，系统的状态响应是具有与输入相同频率的周期运动，如

^① H. 哈肯：《协同学——理论与应用》，224 页。

图 8.3 所示。

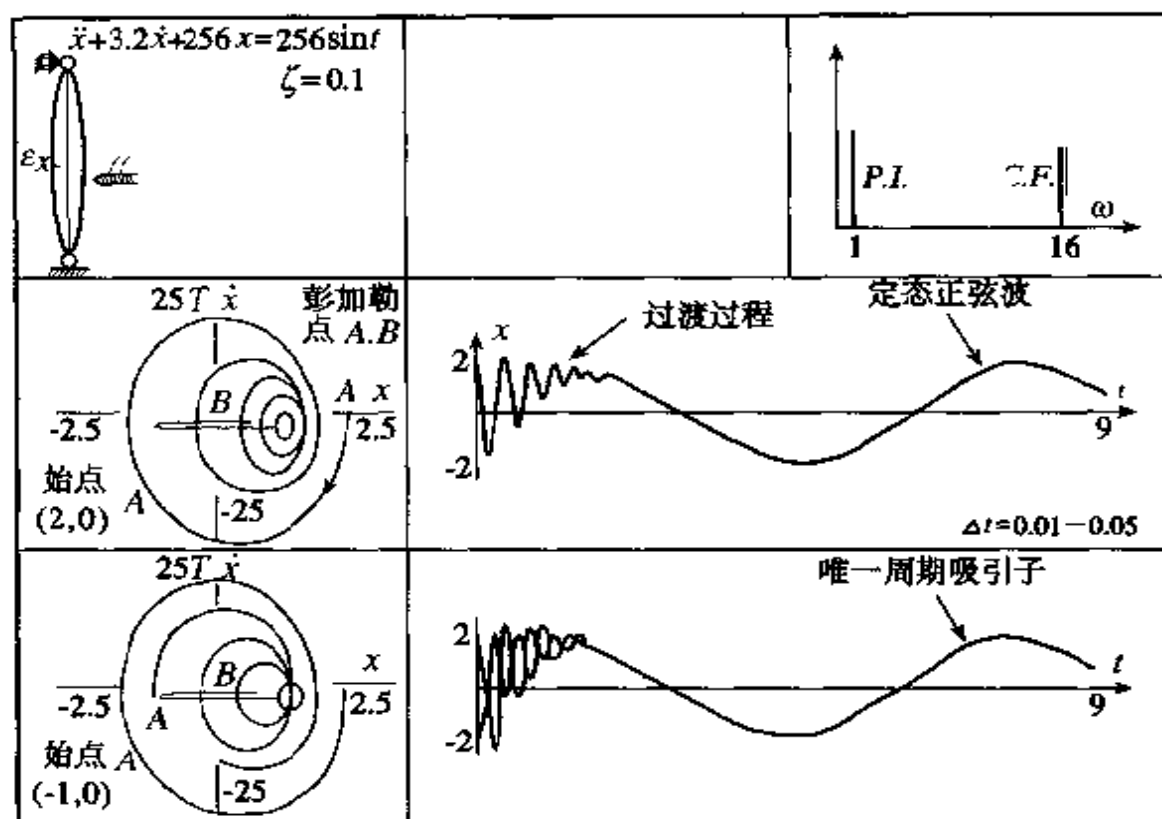


图 8.3

上图为物理模型，一个有钉状末端的钢条，由一个带正弦交流电的电磁铁从侧面作小幅度的振荡来驱动。从任一初值开始，经过一定的瞬态过程，系统将稳定于唯一的周期吸引子上。中图取初值 $(x=2, \dot{x}=0)$ ，左边为相平面 $(x, \dot{x})$ 上的轨道，右边为时间域上的运动。下图增加另一初值 $(x=-1, \dot{x}=0)$ ，由两个不同初值开始的轨道只有瞬态过程的不同，最终都稳定于由他组织作用决定的周期运动。由于叠加原理的作用，线性他组织系统的响应特性与他组织作用定性上相同，只在某些定量特性上有所改变。

非线性他组织系统对外部驱动作用的响应特性由系统自身（齐次方程部分）的非线性特性和驱动作用共同决定，因而响应特性与他组织作用常有定性性质的不同。考察以下强迫项为 0 的杜

芬方程

$$\ddot{x} + 0.4\dot{x} + x^3 = 0 \quad (8.28)$$

(8.28) 只有平衡态，不会出现自激振荡。如图 8.4 所示，这是一个稳定焦点型吸引子，从任何初值出发，系统最终都收敛于平衡态 ($x=0, \dot{x}=0$)。

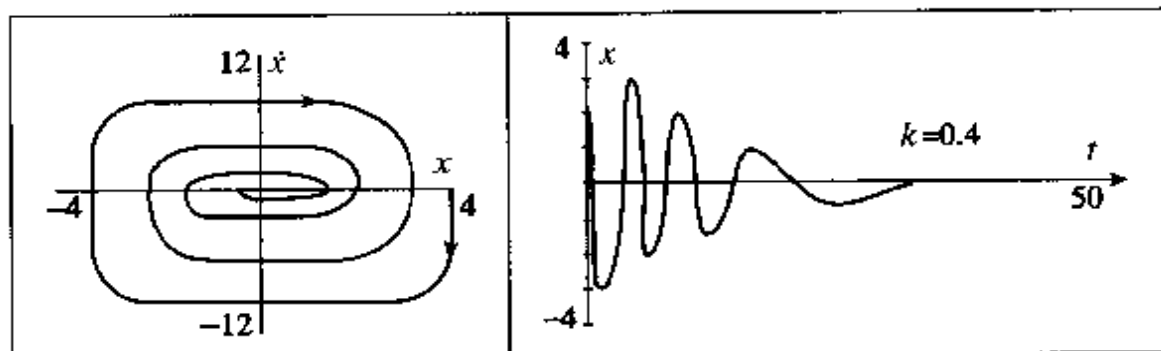


图 8.4

如果对 (8.28) 施加周期性外作用力，系统就会响应以周期运动，但出现了线性系统中不可能有的复杂情形。如以下杜芬方程

$$\ddot{x} + 0.08\dot{x} + x^3 = 0.2\cos t \quad (8.29)$$

在同样的周期外作用力驱动下，这个系统可以响应以五种不同的周期运动，即相空间同时有五个周期吸引子并存，整个空间分为五个吸引域。系统最终以哪一种周期运动响应他组织作用，取决于初始状态落在哪个吸引域。

如图 8.5 所示，图中未画出瞬态过程，左边为相平面运动，右边为时间域上的运动。多吸引子并存是非线性系统的基本特征之一。9.9 节将介绍杜芬方程更复杂的运动。图 8.5 所示为图 9.19 中 (a) 区的情形。

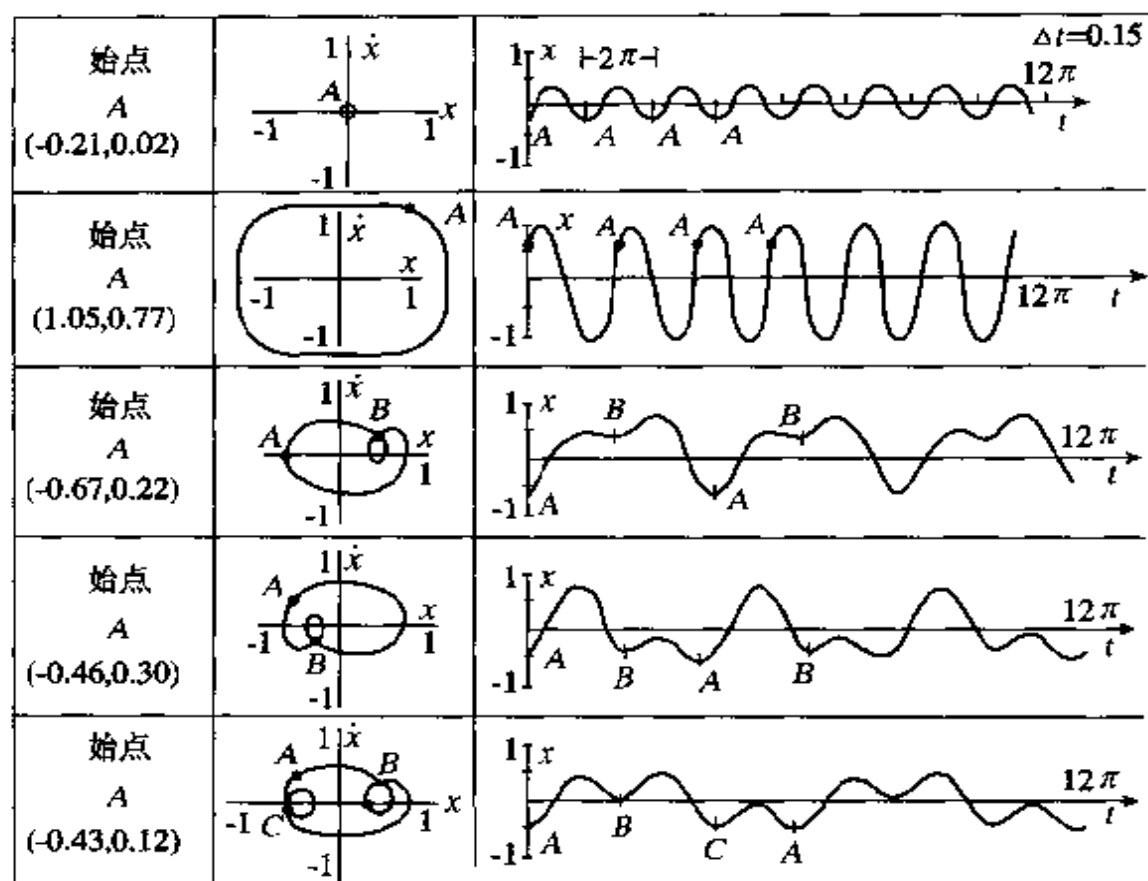


图 8.5

范德坡方程 (8.5) 要比杜芬方程更复杂, 有 4 个控制参数 α , ω_0 , A , ω 。在混沌学诞生之前, 已经了解这种系统有如下特点:

(1) 当 $A=0$ (自由系统) 且 $\alpha \gg 1$ 时, 系统有自激振荡;

(2) 在适当外作用下系统将出现分频现象, 响应频率为外作用频率 ω (基频) 的 n 分之一, 即 ω/n , 如二分频 $\omega/2$, 三分频 $\omega/3$ 等。动力学把分频现象又称为次谐波现象, 反映非线性系统的一种奇异特性。下章将看到, 分频与混沌有密切关系。

(3) 在给定控制参数时, 同一受迫振子可能进入不同的次谐波运动 (即多个周期吸引子并存), 取决于振子如何起动;

(4) 当存在两个不同终态时, 在最终安定于其中一个之前, 系统将在两个可能终态之间犹豫很长时间 (即有很长的瞬态过程)。

建立描述他组织系统动态特性的完整理论，有待非线性动力学的进一步发展，以及系统学家的精心提炼。

8.5 能控性与能观性

60年代以来发展起来的现代控制理论，对他组织系统的研究在很大程度上已超出技术科学层次，接近于或达到基础科学层次。能控性与能观性概念的提出就是重要表现。钱学森曾指出：“事物因素、信息和控制量形成一个相互关联体系，表现为可以用数学表达的一系列关系。……理论控制论的任务就是根据这些定量的关系预见整个系统的行为。有些问题在控制论中是有决定性意义的：如系统的能控性问题和能观测性问题的普遍理论。”^①有关能控性和能观性问题的普遍理论应是系统学的他组织理论的重要组成部分。

任何控制任务都是通过输入控制作用以影响和改变系统的状态或输出而实现的。但并非在任何情形下都能找到适当的控制作用来实现预期的控制目标。有时存在适当的控制作用能使系统从给定的初态转移到预期的终态，有时则不存在这种控制作用。医生给患者治病，打针吃药即施加控制作用，目的是使病人从患病态（初态）转移到正常态（终态）。药到病除的系统是能控的，不治之症是不能控的。简言之，能控性是指控制作用对系统行为状态影响能力的一种度量，一切他组织系统都有能控性问题。

本节主要就线性系统（8.21a）讨论能控性和能观性问题。

定义1 设系统在时刻 t_0 时处于初态 x_0 ，如果在有限时间间隔 $[t_0, t]$ 内能找到一个控制作用 $u(t_0, t)$ 使系统从初态 x_0 到达稳定平衡态，就称初态 x_0 是能控的；如果系统所有初态都能控，就

① 钱学森、宋健：《工程控制论》，修订版，序，北京，科学出版社，1983。

称系统是完全能控的；否则，称系统是不完全能控的。

线性系统的能控性问题已有成熟的理论。能控性准则可简捷地表述为：定常线性系统 (8.21a) 状态完全能控的充分必要条件是其能控性矩阵

$$(B : AB : A^2B : \cdots : A^{n-1}B) \quad (8.30)$$

是满秩的（秩为 n ）。

有效地控制系统要求掌握系统的内部状态信息，能够直接观测的只是系统的输入和输出信息，因而需要依据输入和输出数据来确定内部状态。从输入输出数据可以获得状态数据的是能观测的，否则为不能观测的。医生通过望、闻、问、切去获得病人体内状况的信息，根据是人体作为系统有能观性；又往往不能获得全部信息，原因在于至少对于今天的科学来说，人体还有不能观测的一面。精确地讲，有

定义 2 令 x_0 记 t_0 时刻的系统状态，如果存在时刻 $t > t_0$ ，使得在区间 $[t_0, t]$ 上能由 $u(t)$ 和 $y(t)$ 唯一地确定 x_0 ，就称初始状态 x_0 是能观测的（即系统在时刻 t_0 的状态是能观测的）；如果所有初态都是能观测的，就称系统是完全能观测的。

线性系统的能观性问题也已有成熟的理论。能观性准则为：线性定常系统 (8.21) 完全能观测的充分必要条件是其能观性矩阵

$$Q = \begin{Bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{Bmatrix} \quad (8.31)$$

是满秩的（秩等于 n ）。

非线性系统的能控性和能观性问题，还没有普适的理论和判据。系统学主要研究非线性系统，这方面没有突破性进展，就谈不上建立钱学森所说的有关能控性和能观性的普遍理论。这也表明发展系统学的他组织理论的任务还很艰巨。

思 考 题

1. 从信息传递方式看自组织与他组织的区别。
2. 用系统科学原理阐述现代经济中市场机制与宏观调控的作用及相互关系。
3. 只有把自组织理论与他组织理论结合起来才能给社会现象以科学的解释，为什么？

阅 读 书 目

1. H. 哈肯：《协同学导论》，第 7.1、7.2 节。
2. H. 哈肯：《协同学讲座》，136~137 页，西安，陕西科学技术出版社，1987。
3. 苗东升：《自组织与他组织》，载《中国人民大学学报》，1988（4）。
4. H. A. 西蒙：《人工科学》，第 1、5、6 章，北京，商务印书馆，1987。

第9章 混沌系统理论

非线性系统，不论自组织的或者他组织的，不仅可能有平衡运动和周期运动，还可能有复杂的非周期运动，如混沌。在激光系统中，当输入功率增大到使脉冲光失稳后，就会出现混沌运动的紊光。在贝纳德流系统中，当上下温差增大到使滚筒式运动体制失稳后，就会出现混沌运动体制。一般情形下，当非线性系统离开平衡态足够远，平衡运动、周期运动、准周期运动都失稳后，就可能出现混沌运动。有些系统甚至在平衡态失稳后直接进入混沌态。在这个意义上说，混沌是非线性系统的普遍行为或通有运动体制。因此，研究混沌运动是系统科学的重要课题之一。

9.1 典型系统

所谓典型系统，一是能鲜明地表现出混沌的主要特征，二是数学模型简单，容易处理。在离散系统中，通常取逻辑斯蒂方程(3.13)或(3.14)为典型系统。它的生态学解释是无世代交叠的虫口系统， x 为状态变量， a 或 λ 为控制参量，方程给出第 n 代虫口数 x_n 与第 $n+1$ 代虫口数 x_{n+1} 的确定性关系。给定 x_n 计算 x_{n+1} 的操作叫做迭代，迭代过程就是系统的演化过程，也分瞬态和终态两个阶段。相空间是1维的，即区间 $[0, 1]$ 。控制空间也是1维的，即区间 $[0, 4]$ 。我们来分析这个系统的动态特性，但不作具体的数学推导计算，主要说明定态行为。

在控制空间分段讨论不动点方程

$$ax(1-x) = 0 \quad (9.1)$$

(1) $0 < a < 1 = a_0$ 存在两个不动点 $x_1^* = 0$ 和 $x_2^* = 1 - \frac{1}{a}$, x_1^* 是稳定的, x_2^* 是不稳定的。任取初值 $x_0 \in (0, 1)$, 经过若干次迭代 (瞬态过程), 系统将趋于终态 $x_1^* = 0$ 。这意味着种群系统趋于灭亡。在 $a-x$ 平面上, 这类终态位于图 9.4 中 a 轴上的 $0-a_0$ 线段上。

(2) $1 < a < 3 = a_1$ $a_0 = 1$ 是一个临界点, $a > 1$ 时不动点 x_1^* 失稳, x_2^* 变为稳定的。任取初值 x_0 进行迭代, 经过一段过渡过程, 系统最终将稳定到定态 $x_2^* = 1 - \frac{1}{a}$, 如图 9.1 所示。

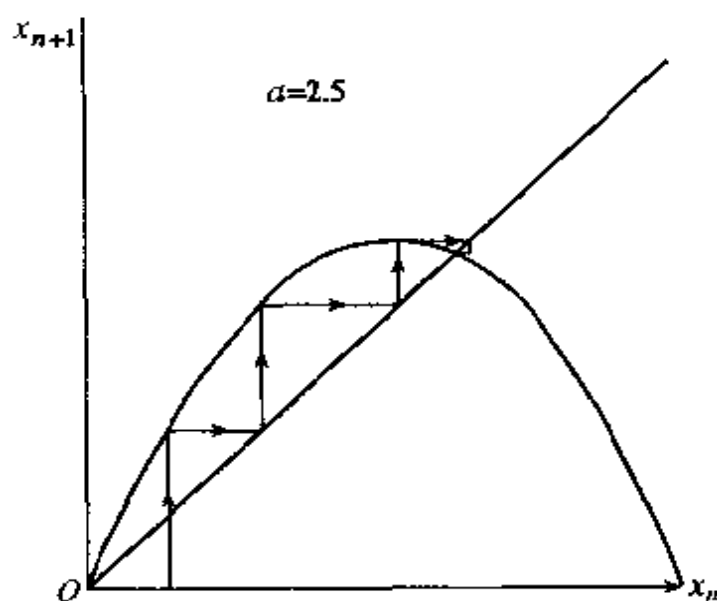
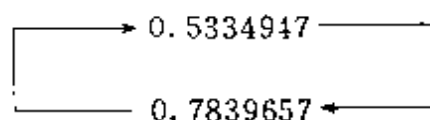


图 9.1

x_2^* 随 a 不同而不同。例如, 取 $a=2$, 终态为 $x_2^* = 0.5$; 取 $a=2.5$, 终态为 $x_2^* = 0.6$ 。随着 a 的增大, 稳定平衡态 x_2^* 也增大, 但系统行为没有定性性质的变化。这类定态点表示为图 9.4 中区间 (a_0, a_1) 上方的那段弧线。

(3) $a_1 = 3 < a < a_2$ $a_1 = 3$ 是又一个临界点, 只要 $a > 3$, x_2^* 就

失去稳定性(由虚线表示失稳的轨道,下同),出现一对稳定的周期点 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$,在瞬态过程结束后,系统将稳定于两点周期运动,如图 9.2(a)所示。若取 $a=3.15$,系统的终态是以下两点周期运动



这表示如果虫口数今年为 $\bar{x}_1$,则明年为 $\bar{x}_2$,后年又回到 $\bar{x}_1$,如此循环往复。如图 9.2 (b) 所示。

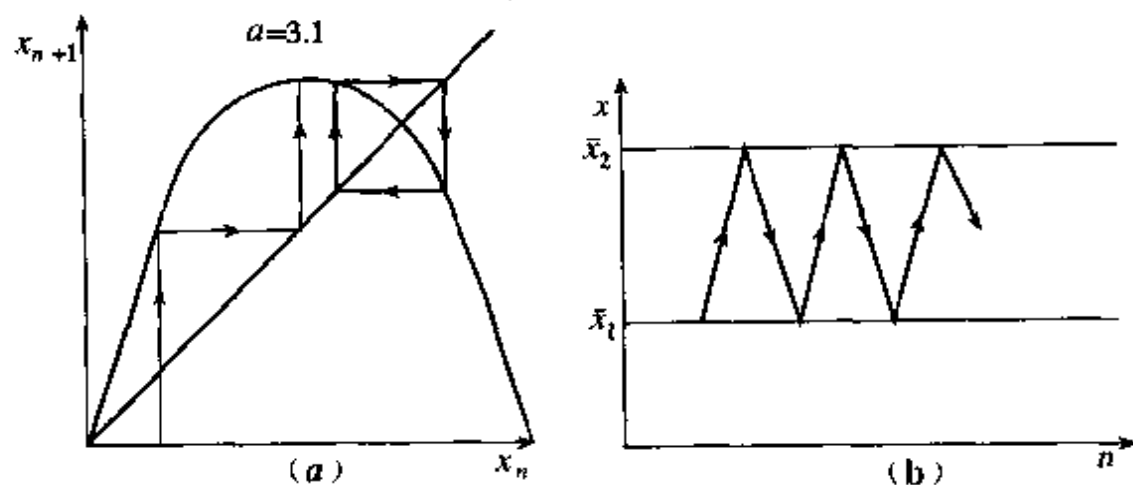
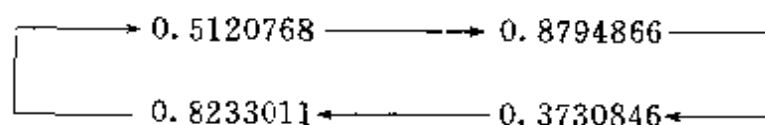


图 9.2

(4) $a_2 < a < a_3$ 在 $3 < a < a_2 = 1 + \sqrt{6}$ 的范围内,不论 a 取何值,对于 $(0, 1)$ 内的几乎所有初值,系统的终态行为都是两点周期,差别只是周期点的数值大小。这些周期点对应于图 9.4 中分叉为上下两支的弧线。 $a_2 \cong 3.4495$ 是新的临界点,从此点开始两点周期运动失稳,代之以稳定的 4 点周期运动,如图 9.3 所示。若取 $a=3.55$,这种稳定的 4 点周期运动为



只要 $a < a_3$,系统终态始终是这种 4 点周期运动,只是数量有差别,如图 9.4 所示 (a_2, a_3) 上方的两支弧线。

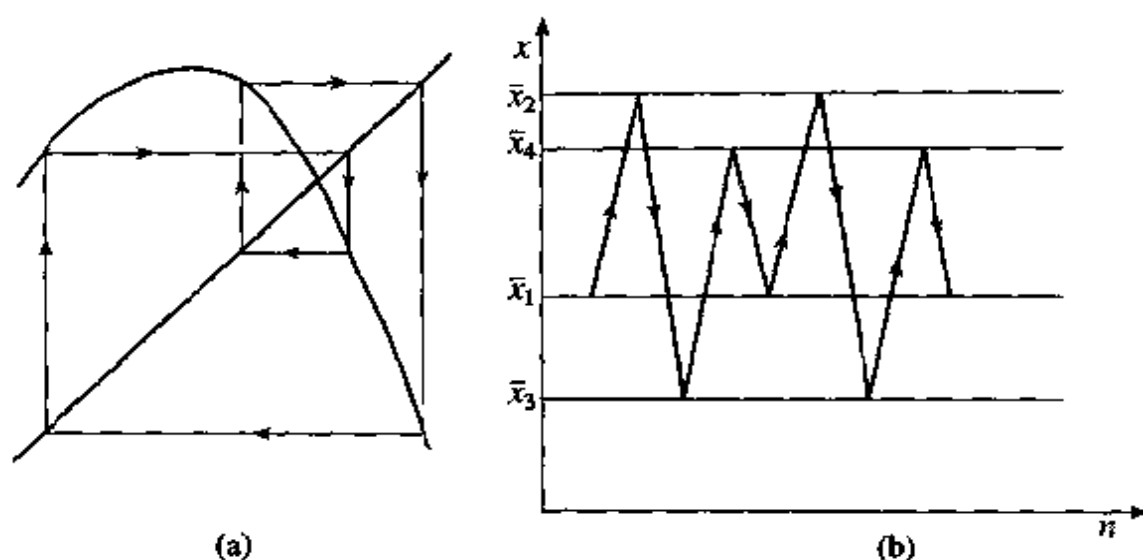


图 9.3

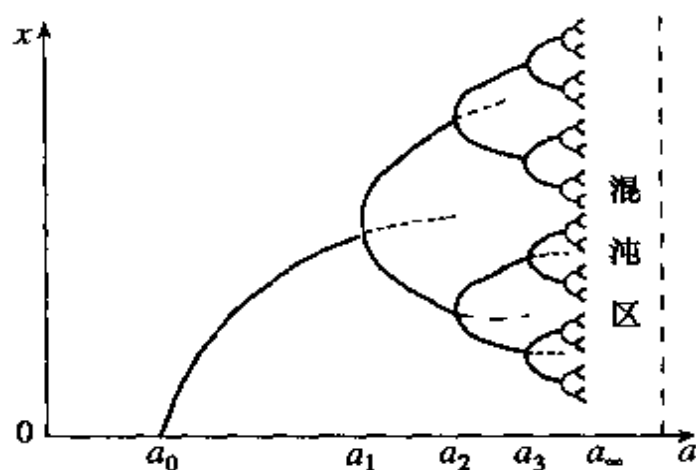


图 9.4

(5) $a > a_3$ $a_3 \cong 3.5441$ 是新的临界点, 由此点开始 4 点周期运动失稳, 代之以稳定的 8 点周期运动。随着 a 继续增大, 还会相继出现无穷多个临界点 $a_4, a_5, \dots, a_k, \dots$ 。每当跨越一个新的临界点 a_k , 原来稳定的 2^{k-1} 点周期运动就失稳, 代之以稳定的 2^k 点周期运动。这种每经过一次分叉稳定运动周期就增加一倍的现象, 称为倍周期分叉。一直到

$$\lim_{k \rightarrow \infty} a_k = a_\infty (= 3.569945 \dots) \quad (9.2)$$

一切周期运动均失稳,系统进入周期无穷大即非周期的运动体制,亦即混沌运动。如图 9.4 所示, $0 < a < a_{\infty}$ 为系统的周期区, $a_{\infty} < a < 4$ 为系统的混沌区。横轴 a 为控制空间,纵轴 x 为相空间,共同张成 2 维的乘积空间,即 $a-x$ 平面。图 9.4 就是在这个乘积空间考察系统,直观形象,对于低维系统十分方便。

连续系统通常以洛伦兹方程

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\sigma(x-y) \\ \dot{y} &= rx - y - xz \\ \dot{z} &= xy - bz\end{aligned}\quad (9.3)$$

为典型系统。这是一个 3 维系统, x, y, z 为状态变量, σ, r, b 为控制参量。相空间和控制空间都是 3 维,乘积空间是 6 维,无法像逻辑斯蒂方程那样作直观考察,只介绍下表以便于后面讨论混沌运动的特性。

洛伦兹系统分叉与混沌一览表

参数 r 的范围	解 的 性 质
<1	趋向无对流定态
$1 \sim 13.926$	趋向三个不动点之一
$13.926 \sim 24.06$	存在无穷多个周期和混沌轨道
$24.06 \sim 29.74$	出现一个奇怪吸引子,但仍有一对稳定不动点
$29.74 \sim 148.4$ $99.526 \sim 100.79$ $145.9 \sim 148.4$	混沌区,其中 为一个内嵌的倍周期序列 为倍周期分叉序列
$148.8 \sim 166.07$	周期区
$166.07 \sim 233.5$ $166.07 \sim 169$ 233.5 附近	混沌区,其中 从周期到混沌的阵发过渡 与 148.4 附近类似的分叉序列
$233.5 \sim \infty$	周期区,由 $r \rightarrow \infty$ 往下的倍周期序列

逻辑斯蒂方程在进入混沌区后的运动有什么特点?一般地说,

混沌运动有什么特点？这是本章讨论的中心。本章后面几节主要是对混沌作非形式化的描述，略去遍历性、混合性等必须用艰深数学工具才能说明的混沌性质。现在尚无关于混沌的严格而普适的数学定义。这里只介绍 1 维连续映射的混沌定义。

定义 1 令 $f(x)$ 为区间 I 到自身的连续映射，如果满足以下条件

(1) f 的周期点的周期无上界；

(2) 存在 I 的不可数子集 S ，满足

a. 对于任何 $x, y \in S$ ，当 $x \neq y$ 时有 $(n \rightarrow \infty)$

$$\limsup |f^n(x) - f^n(y)| > 0; \quad (9.4)$$

b. 对于任何 $x, y \in S$ ，有 $(n \rightarrow \infty)$

$$\liminf |f^n(x) - f^n(y)| = 0; \quad (9.5)$$

则称 $f(x)$ 描述的系统为混沌系统， S 为 f 的混沌集。

9.2 以分形几何描述的动力学特性 奇怪吸引子

第 3 至 8 章表明，相空间的几何方法是描述系统动态特性的强有力工具。混沌作为非线性系统的典型运动体制，也需要几何工具。但只限于描述规则图形的传统几何学已不适用，描述混沌须用曼德勃罗创立的分形几何学。

耗散系统的混沌是奇怪吸引子上的运动。奇怪吸引子又叫分形吸引子，因为它们都是相空间的分形点集，不能用传统的规则几何图形表示。保守系统没有吸引子，但它的混沌运动的复杂几何特征同样须用分形刻画。曼德勃罗创立的分形几何既是描述奇怪吸引子的强有力数学工具，也是描述保守系统混沌运动的复杂几何特征的强有力工具，常被称为混沌几何学。

先看两个用数学方法形成的分形。图 9.5 是在 1 维空间形成

的分形点集，称为康托集合。从一个有限线段开始，把它三等分，除掉中间一段，再对其余两段作同样处理，将这种操作无限地进行下去，最后剩下的点集，就是 1 维空间的分形集。其特点是包含无穷多个点，不连续、非均匀地分布在线段上，总长度为 0，却是不可数的点集，能与区间 $[0, 1]$ 建立一一对应。形象点说，这种点集仿佛无数尘埃不规则地落在一条线上，故又称为康托尘埃。

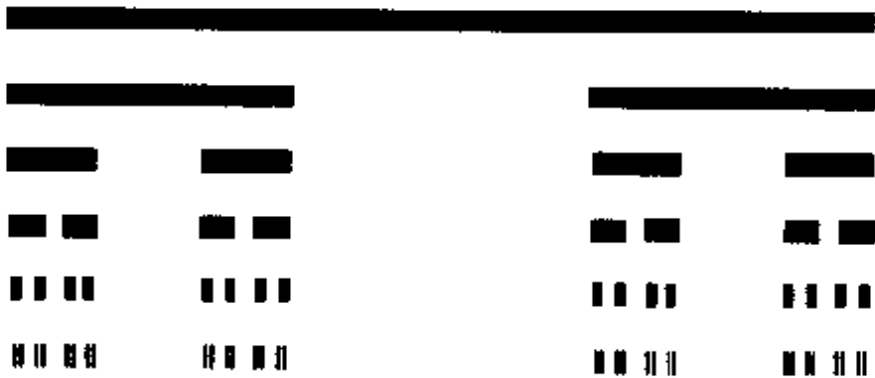


图 9.5

以图 9.6 中的正方形为源图，把它 9 等分，除掉中心那一块，

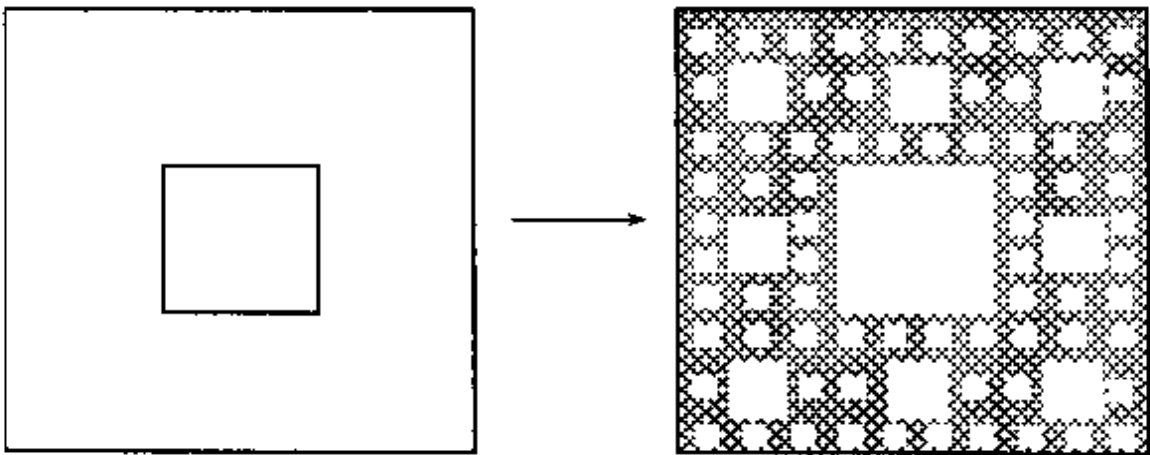


图 9.6

对余下的 8 块再作 9 等分，再除掉中心那一块，把这种操作无穷地进行下去，最后剩下的点集合，是一个平面上的分形图，称为谢尔

宾斯基地毯。特点是处处有洞但连续,面积为 0 但周长无穷大。

分形特点是部分与整体具有某种自相似性。按上述数学方法作出的分形,部分与整体具有严格意义上的自相似性,任意取出一部分,都具有与整体完全一样的结构。这种自相似表现在无穷多层次之间。混沌系统在相空间形成的奇怪吸引子一般不具有这种严格的自相似性,而表现为具有无穷多的层次嵌套,从任何尺度去看都具有更小尺度上的精细结构,并不要求任何部分都与整体具有完全相同的结构。

混沌系统存在奇怪吸引子的根源在子系统自身的强烈非线性。图 9.7 示意的是厨师揉面团操作的几何模型,由伸缩变换和折叠变换构成,俗称面包师变换。首先把面团横向拉长、纵向拉细,然后将它折叠对齐,如此反复进行,以至无穷。折叠是一种非常强烈的非线性变换。设 p 与 q 是面团中两个相邻的点,在如此反复拉伸与折叠的变换中,两点的轨道不断分离、会聚、穿插包抄、盘旋缠绕,最终形成了极其复杂的分形结构。混沌系统都有这类非线性变换。

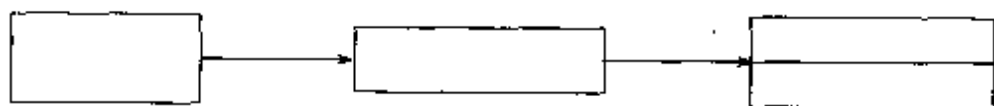


图 9.7

分形是不规则的形状,宏观地看显得支离破碎,又称为碎形。不规则性连通复杂性。几何上的不规则性、复杂性,是造成动力学不规则性、复杂性的深层次原因。用来刻划规则几何形状定量特征的概念,如长度、面积、体积等,对于刻划分形已无意义,这里需要的是刻划图形不规则程度、复杂程度的定量概念。由此引出分维(可以取分数值的维数)概念。维数是刻划系统几何特性极为重要的概念。在研究规则图形的传统几何学中,点是 0 维的,线是 1 维的,面是 2 维的,体是 3 维的,抽象空间的维数可能是

任何整数。传统几何只研究具有整数维的图形。但整数维不能刻画分形的特性。维数可以取分数是分形区别于整形的一种基本特性。有各种不同的分维定义。最简单的是所谓容量维，产生于对测量概念的推广。对某物体进行测量的实质是用选作单位的小物体去覆盖被测量物体，能覆盖住被测对象的最少单位数就是它的测度。由此得到

定义 给定一个点集 X ， $N(\epsilon)$ 是能够覆盖住 X 的直径为 ϵ 的小球数，如果极限

$$D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \frac{1}{\epsilon}} \quad (9.6)$$

存在，就称 D_0 是点集 X 的容量维。

现在讨论几种混沌系统的奇怪吸引子。首先看逻辑斯蒂方程。状态空间是纵轴上的区间 $[0, 1]$ 。 $a = a_\infty$ 时的系统运动还不是典型的混沌，但它的吸引子已具有分形结构，是对纵轴上线段 $0-1$ 施行类似康托集那样的分割挖空变换而形成的，包括把一切失稳的 2^* 周期点挖去。 $a > a_\infty$ 后是典型的混沌运动，每个 a 值对应一个具体系统，相空间 $0-1$ 线段被以更复杂的方式分割挖空，包括去掉一切周期点。不同的 a 有不同的 D_0 ， $a = a_\infty$ 时 $D_0 = 0.538$ ， 3^* 周期的极限点对应的 $D_0 = 0.34$ 。

另一个较简单的离散混沌系统是埃农方程

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= 1 - ax_n^2 + y_n \\ y_{n+1} &= bx_n \end{aligned} \quad (9.7)$$

这是一个 2 维系统，吸引子为相平面上的分形图形，如图 9.8 所示，(b) 为 (a) 中方框部分的放大，(d) 为 (c) 中方框部分的放大，显示埃农吸引子具有层次无穷嵌套的复杂结构，但并非部分与整体严格自相似。经计算，当 $a = 1.4$ ， $b = 0.3$ 时，此吸引子的分维 $D_0 = 1.26$ 。

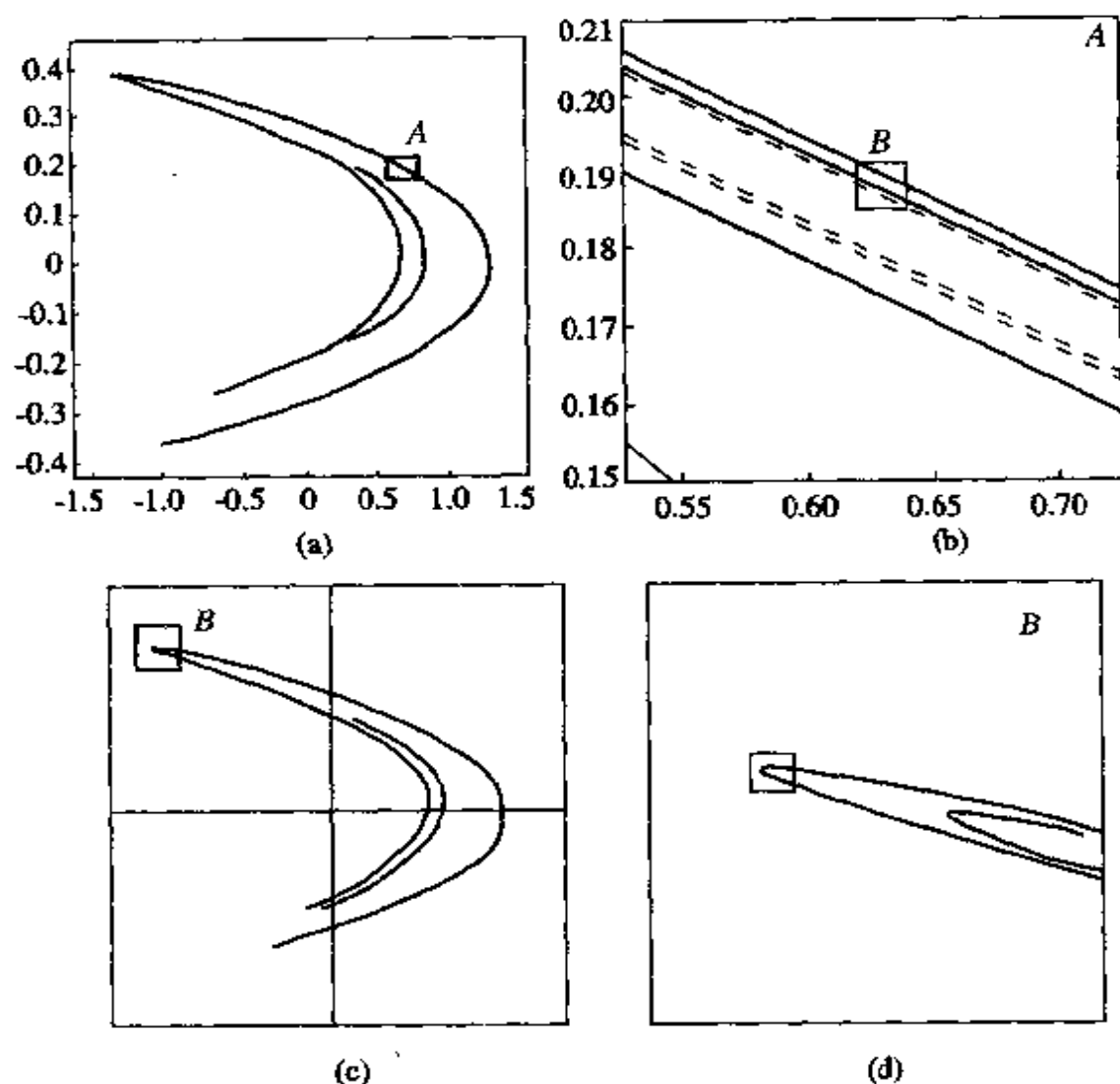


图 9.8

洛伦兹系统的奇怪吸引子如图 9.9 所示，取 $r=28$, $b=8/3$, $\sigma=10$ 。这是一个 3 维空间的分形点集，有点像一对蝴蝶翅膀，由相连的两扇组成，具有无穷嵌套的自相似结构，在任何尺度下观察都显示出多层次结构，但并非严格自相似，把某一部分放大，不一定有类似蝴蝶翅膀那样的整体形态。它的容量维 $D_0=2.06$ 。

再介绍一个保守系统混沌运动的例子，考察它的分形几何特征。2 维离散系统

$$\begin{aligned} J_{n+1} &= J_n + K \sin \theta_n \\ \theta_{n+1} &= \theta_n + J_{n+1} \end{aligned} \quad (9.8)$$

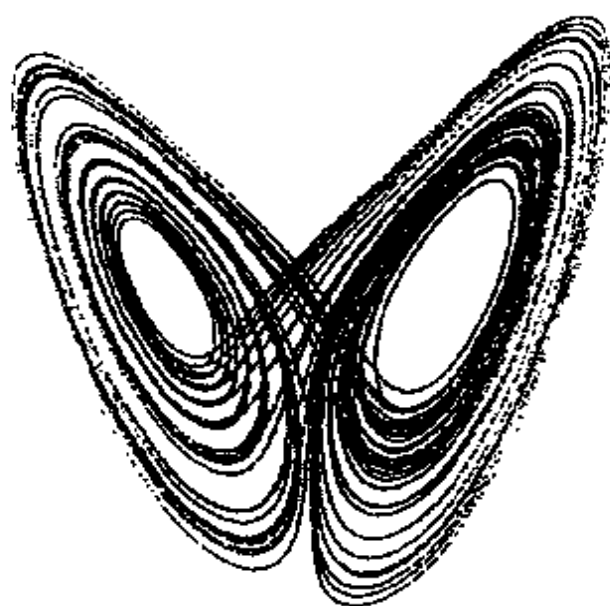


图 9.9

称为标准映射，在参数 K 的一定范围内呈现混沌运动。当 K 值增大到不可积区域时，KAM 环面开始变形，最初只有少数迷走轨道，可看作随机性的“种子”； K 进一步增大，KAM 环面开始出现破坏，形成很小的随机层， $K=0.9$ 时如图 9.10(a) 所示。

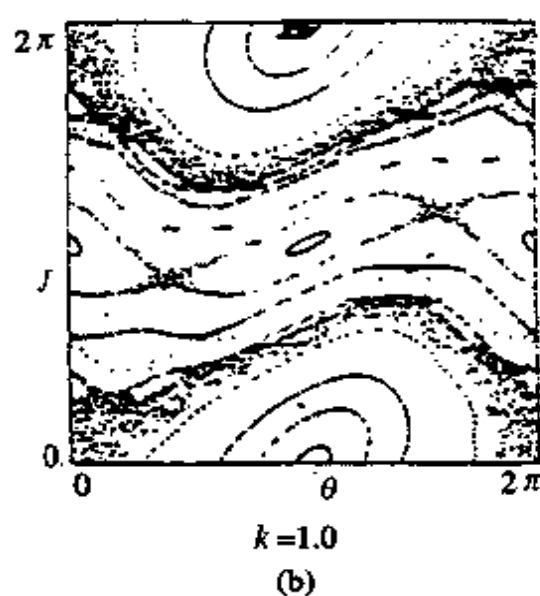
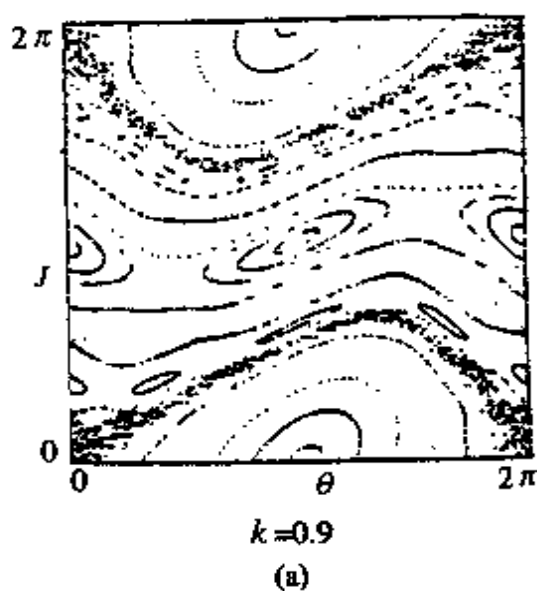


图 9.10

随着 K 的进一步增大, KAM 环面进一步破坏, 在中央小岛两侧双曲点附近生成新的随机层(阴影), $K=1.0$ 时如图 9.10(b)所示, 大部分仍为规则运动岛。当 K 增大到 3.0 时, 随机性占主导地位, 进入全局混沌, 只有两个规则运动的小岛, 如图 9.10(c)所示。

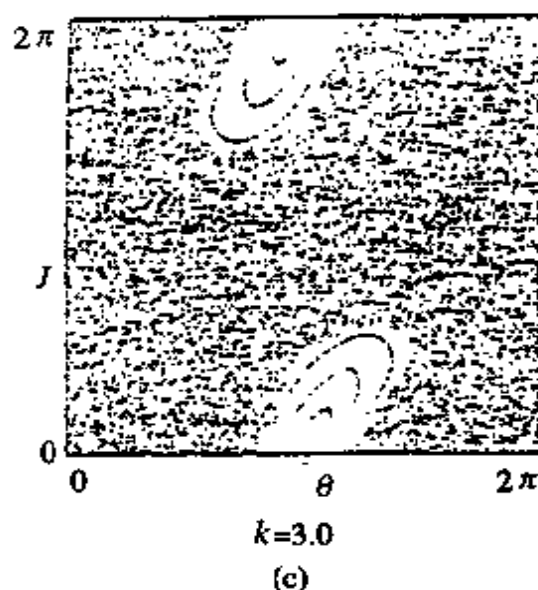


图 9.10

9.3 非周期定态

奇怪吸引子上的运动是一种定态行为。因为奇怪吸引子是相空间的低维点集合, 从吸引域中任一点开始的运动在经历一定的过渡过程之后, 都会进入这个点集合; 一旦进入, 不论以后的运动多么混乱, 就再也不会走出去。因此, 就整体看, 这个低维点集合代表系统的一种稳定定态。在奇怪吸引子上的运动是系统的一种稳定定态行为。

奇怪吸引子不是周期轨道, 也不是多个周期轨道的叠加(准周期轨道), 而是不能分解为周期轨道之和的分形点集。与周期运动相同, 在奇怪吸引子上的运动具有回归性, 每个状态都会一再

地重复自身。但回归性不等于周期性。混沌运动的回归性是不严格的，一是只要求回到附近的状态，不要求完全重复该状态；二是在不规则的时间上重复自身，不能要求按确定的周期回归。具有回归性也是稳定定态即吸引子的特征之一。

在动力学很长的发展史上，直到 20 世纪 70 年代之前，科学界都把非周期运动看作瞬态行为，不承认系统可能存在非周期的定态行为。日本学者上田皖亮早于洛仑兹发现了混沌，由于权威物理学家囿于传统偏见，把非周期运动与瞬态行为等同起来，这个重大发现被否定了。洛仑兹第一个冲破传统偏见，承认非周期运动也可能是定态行为，提出“确定性非周期流”的概念，发现了混沌，对系统科学作出重大贡献。

非周期性虽然不是混沌运动的本质特征，却是它的必要特征。混沌必定是非周期运动。但混沌不是任意一种非周期运动，而是确定性的非周期性。所谓“确定性”，一是指混沌是由确定性动力学方程自身产生的非周期运动，不是外部扰动引起的，二是指混沌是一种定态行为，不是系统在过渡过程中呈现的非周期性。

认识到存在非周期的定态，混沌是一种非周期定态，乃是混沌研究的重要理论贡献。

9.4 对初值的敏感依赖性

非周期性还不足以表示混沌运动的本质特点。系统长期行为敏感地依赖于初始条件才是混沌区别于其他运动体制的本质特征。

动力学系统的长期行为（略去过渡过程的终态行为）取决于系统的动力学规律（由系统的数学方程表述）和初始状态。对于给定数学方程的系统，运动轨道由初值决定，称为轨道对初值的依赖性。仔细分析，这里有三种情况。对于具有渐近稳定吸引子的系统，在吸引域内系统的终态行为有“遗忘”初值的机制，从

任何初值开始的轨道都走向同一吸引态，即系统的长期行为不依赖于初值。对于中心点型不动点附近的运动轨道，或者保守系统等能面上的运动轨道，初值的不同将导致轨道的不同，即轨道对初值有依赖性；但只要初值相差不大，轨道的差别也不大，即稳定性理论讲的“初值的小偏离只能导致轨道的小偏离”，表明轨道对初值具有不敏感的依赖性。第三种情形是轨道敏感地依赖于初值，初值的微小差别在后来的运动中被不断放大，导致运动轨道显著的不同。混沌运动就属于这种情况。

为使读者获得关于敏感依赖性的具体印象，我们就逻辑斯蒂方程作些数值分析。下表给出的是就三个不同初值计算的状态数值，初值之差在 10^{-6} 数量级，经过 300 次迭代所得状态 x_{300} 之差却达到整个状态空间的尺度，即 $10^0=1$ 的尺度，相差 6 个数量级。对于混沌系统，只要初值之差不为 0，在后续演化中不同轨道将按指数式相互分离，造成在相空间尺度上的巨大差别。真可谓“差以毫厘，失之千里”。

迭代次数 n 初 始 值	1	2	50	300
0.199999	0.639997	0.921603	0.001779	0.597519
0.200000	0.640000	0.921600	0.251742	0.987153
0.200001	0.640002	0.921597	0.421653	0.004008

洛仑兹是现代混沌的发现者之一，他提出著名的“蝴蝶效应”来形象而夸张地说明这种敏感依赖性：纽约的一只蝴蝶扑腾一下翅膀这样微小的初值扰动，可能导致三个月后得克萨斯州天气（大气系统的长期行为）的巨大不同。

动力学早已发现在非混沌运动中也可能出现对初值的敏感依赖性，但与混沌运动有原则的不同。考虑经典力学著名的理想摆

$$\ddot{x} + \omega^2 \sin x = 0 \quad (9.9)$$

x 为角位移, $\dot{x}$ 为角速度, 相空间是由 x 和 $\dot{x}$ 支成的平面。由于运动的周期性, 只须考虑 $-\pi < x \leq \pi$ 的一段, 如图 9.11 所示。图中连接鞍点 $A(-\pi, 0)$ 和 $B(\pi, 0)$ 的两条分界线, 把相平面分为三个区域, 对应三种不同的定态行为。中间是摆动区, 上下是方向相反的转动区。从三个区域的内点引出的轨道都是不敏感地依赖于初值, 以其邻域内的其他点为初值的轨道仍属于同一类型, 不会被放大到引起轨道定性性质的改变。但三个区域的两条分界线特别是它们的两个交点 $(\pm\pi, 0)$ 则不同, 初值的任何微小偏差, 都会导致运动轨道改变其类型, 或为围绕中心点的周期摆动(中间区), 或为由右向左的转动(下区), 或为由左向右的转动(上区)。但是, 这个系统的相空间中具有这种性质的点只是零测度的集合, 系统取这种点为初值的概率为零。混沌系统则不同, 奇怪吸引子是非零测度的点集, 吸引域中所有点都具有这种性质, 初值的任何偏差都会被放大, 进入吸引子的位置稍微不同, 轨道将指数式相互分离。

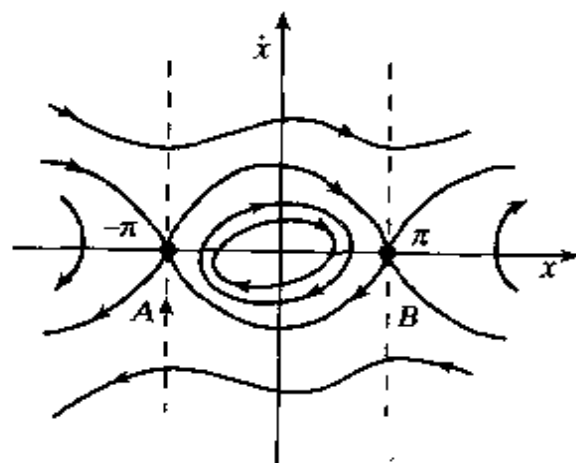


图 9.11

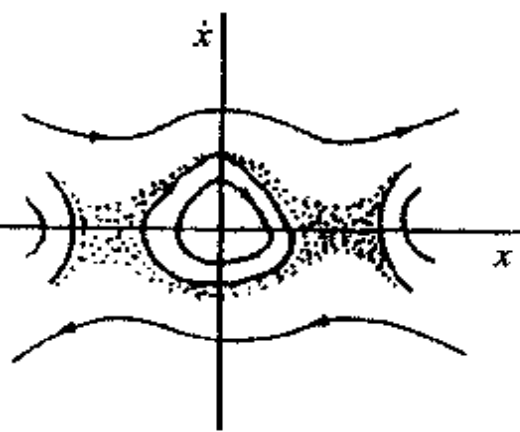


图 9.12

图 9.11 中作为分界线的两条轨道很值得注意, 其上的相点在 $t \rightarrow \infty$ 时趋于鞍点 A 或 B , 属于非周期运动。可见, 存在不是混沌运动的非周期轨道。

9.5 确定性随机性

与动力学以往研究的运动形式平衡态、周期态、准周期态相比,混沌性是一种不确定性。控制参数进入混沌区后,系统状态在相空间的演化类似于物理学研究的布朗粒子在溶液中的无规行走,表现出貌似随机运动(见第6章)那样的不规则、不确定。考察逻辑斯蒂方程在 $a > a_{\infty}$ 后的相轨道,参见图 9.13。取一初值 x_0 进行迭代,共迭代 500 步,前面一段计算所得 x_n 属于瞬态过程。为躲过瞬态,舍掉前 300 步,把其余 200 步所得 x_n (定态)标在纵轴上的相空间 0—1 线段中。所得结果显然是一个无规数列,与通常所说的随机数原则上无法区分。为了看得更清楚些,令控制参数 a 取在 4 片混沌区(见 9.7 节),这时的相空间及奇怪吸引子被分为 4 部分。代表定态的后 200 步迭代结果的 x_n 将顺序落入这 4 个混沌片中,这是确定的,但每一片都有无穷多个相点, x_n 究竟落在哪个点上是完全无规的、随机的,形成分布在 4 个小区间上的随机数。

洛仑兹方程也一样,只是具体表现方式不同。从图 9.9 两片中的某一片开始,相点沿着某条轨道由外向内绕行,会随机地突然跳到另一片的某条轨道上重新由外向内绕行,然后又随机地跳回第一片,如此在两片之间随机地来回跳跃。

方程 (9.9) 描述的可积保守系统,不会发生随机运动。但只要加入不可积扰动项 $\varepsilon \sin(kx - \Omega t)$,就得到以下不可积系统

$$\ddot{x} + \omega^2 \sin x - \varepsilon \sin(kx - \Omega t) = 0 \quad (9.10)$$

当 ε 足够小时 (9.10) 代表近可积系统,小的不可积扰动使分界线周围产生少量的随机运动,称为随机层,如图 9.12 所示。只要 ε 不为 0,就会有随机层,但不改变总的运动图像。随着 ε 逐步增大,随机层逐步发达,最后转变为混沌运动。

在图 9.10 所示系统中,由不可积性引起的任何迷走轨道都是

随机数序列，代表系统可能出现的随机运动；随着不可积性增强到一定阈值，迷走轨道代表的随机运动将分布在整个等能面上，就形成混沌行为。总之，一切混沌系统都呈现出这种类似随机运动的特点，或者干脆说混沌是一类随机运动。

凡随机现象都表现出某些统计确定性，遵循统计规律，因而才可能成为科学描述的对象。混沌被当作一种随机现象，也由于它表现出一定的统计规律。上述以及其他被研究过的混沌运动都表示出某种统计确定性，须用概率统计方法描述。如作频谱分析，计算李亚普诺夫指数和分维等统计量。混沌具有类似于随机噪声的宽功率谱，不同于周期运动具有尖峰的功率谱。

9.1 节所给混沌的数学定义也反映出这种随机性。(9.4)表示从不同初值引出的两条轨道不时会相互远离，不论初始误差多么小，总会在某些时刻显著的远离。(9.5)表示从不同初值引出的两条轨道不时会无限靠近。对于任意选择的两个初值，轨道时而远离，时而靠近，漂忽不定，正是随机运动的特点。

但混沌运动的随机性与第6章讲的随机性有原则的不同，那里的随机性是通过运动方程中加入随机外作用力或随机系数或随机初始条件等三种方式表现出来的，应称为外在随机性。混沌系统的动力学方程是确定的，既没有随机外力，也没有随机系数或随机初值，随机性完全是在系统自身演化的动力学过程中由于内在非线性机制作用而自发产生出来的。混沌是确定性系统的内在随机性，一种自发随机性，或动力学随机性。这样就得到以下的非形式化定义。

定义2 混沌是一种确定性随机性，即确定性系统内在产生的随机性。

发现确定性随机性不仅具有重大科学意义，而且具有重大哲学意义。确定性与随机性历来被科学和形而上学哲学视为完全对立的东西，混沌却证明两者是相通的，或者说是矛盾的统一，确定性内在地包含随机性。自称是混沌福音传教士的物理学家福特

写道：“因此虽然与通常的意见相反，但在‘确定性地随机的’这一说法中绝对没有矛盾。确实，可以非常合理地建议，混沌的最一般定义应该写作：混沌意味着确定论地随机。”^① 不论福特是否自觉，他在这里是为辩证法作辩护，提倡用辩证逻辑定义混沌这个现代科学概念，使两个对立的义项不可分割地包含在同一定义中。在科学上，发现确定性系统能内在地产生出随机不确定性，须用统计方法描述，预示着有可能把确定论和概率论两种对立的描述体系沟通起来。如果能做到这一点，必将带来科学的极大进步。

9.6 长期行为的不可预见性

科学理论的功能是给对象系统的内在机理作出解释，预测它未来的演化过程。经典科学发现两大类系统，发展了两套描述体系。一类是确定性系统，典型代表是机械运动，发展了确定论的描述体系，即牛顿力学的描述体系。一类是随机性系统，典型代表是热力学过程，发展了须借助统计概念进行论证的概率论描述体系，即统计力学的描述体系。不论是把统计规律看作一大类客观系统固有的属性，还是看作来自人类知识的不完备，概率方法都是与确定论描述性质完全不同的另一种描述体系。

按照确定论描述体系，一个确定性系统的动力学规律是完全确定的，表现为它的数学模型是完全确定论的，系统的每个具体行为轨迹完全由初始条件决定，给定初始条件后，可以精确地预见它的未来。如人造卫星何时进入设计轨道，何时到达近地点，可以相当精确地预测。随机系统则相反，它的未来行为每一步都无法预测，或者说只能作统计意义上的预测。如投掷硬币，只能预测麦穗朝下的概率为 0.5。

^① 引自木水共编：《走向混沌》，55 页，上海，上海新学科研究会，1995。

混沌是确定性系统的运动体制，但与上述经典科学的基本信念不同，由于内在非线性机制造成对初值的敏感依赖性，混沌系统的长期行为是不可预测的。任何实际系统的初始条件都不可能绝对精确地确定，误差是不可避免的。只要初始条件稍有误差，通过在混沌运动过程中逐步非线性地放大、积累，当过程进行到足够长以后一切初始信息将损失殆尽，进一步计算所得结果完全不反映系统的真实状态，系统将走向何方不得而知。在这一点上，它与随机运动是一样的。确定性与可预见性并非一回事，确定性系统的长期行为不可以预见，这是混沌研究带来的重要新认识。

但随机系统的短期行为也是不可预测的。投掷硬币的结果每一次都不可预测。混沌是由确定性系统产生的，它的短期行为是可以预测的。不论 n 多大，在逻辑斯蒂方程中由 x_n 计算得到的 x_{n+1} 都是精确的。这是内随机性与外随机性的又一区别。短期行为可以预测而长期行为不可预测，是混沌运动的另一主要特征。

非线性系统普遍存在混沌运动，混沌的长期行为不可预测，这个发现揭露出科学认识中长期存在的一种盲目性，使我们意识到人类的预见能力极其有限。现实世界的系统都是非线性的，控制空间存在混沌区是非线性系统相当普遍的现象。只要系统处于混沌区，我们就无法对它的长期行为作出预测。但混沌运动并非绝对不可预测。确定性非线性系统的混沌区在控制空间的位置是确定的，奇怪吸引子在相空间的位置也是确定的，每个吸引域的范围是确定的（尽管分界线具有分形结构，难以精确划分），从初值开始的运动必定走向吸引子，奇怪吸引子的分维数是确定的，系统在其上的运动遵循统计规律。这些都是确定性因素，因而使混沌运动又有可预见的一面。从实用的角度看，人类对于未来的长期行为并不需要把握它的细节，只要对整体趋势有个大概估计就可以了。人类在实践中遵循的原则是：“一万年太久，只争朝夕。”混沌运动长期行为不可预测性的发现不应成为新的悲观论的依据。

实际上，混沌学研究从另一方面增加了人类的预见能力。对于许多貌似混乱无规的复杂过程，人们在长期实践中积累了大量数据，因无法处理而被视为不可预见的现象。混沌研究使人们理解了它们可能是某个低维奇怪吸引子上的混沌运动，如果能够构造出适当的奇怪吸引子，就可运用混沌学知识对它进行描述，作出某种预测。科学家已从数学上证明，在不知道系统动力学方程的情况下，根据实际数据构造出奇怪吸引子是可能的。这种吸引子重构技术已被应用于许多过去认为不能预测的问题，例如用于股票市场等复杂系统的预测，并取得很好的效果。以发现长期行为不可预测震惊了世界的混沌又扩大了人类可预测的范围，许多长期无法预测的现象获得了预测方法，这是很富启发性的。

9.7 混沌序：貌似无序的高级有序性

混沌现象给予人们的第一印象往往是混乱不堪，毫无规则。东西方各种文化从古至今都有混沌这个术语，都包含（但不限于）混乱的语义。因此，没有接触过现代混沌研究文献的人很容易从一般文化的角度去理解这一现代科学概念。我国一些社会科学工作者曾把混沌学译为混乱学、纷乱学、紊乱学、杂乱学，就说明这一点。但这是一种误解。

混沌有表观混乱的一面，但混沌不等于混乱，在似乎混乱的表观下存在着多样、复杂、精致的结构和规律，是一种貌似无序的复杂有序，一种非平庸的有序，一种与平衡运动和周期运动本质不同的有序运动。我们仍以逻辑斯蒂方程为例子来说明这一点。图 9.13 是该系统在乘积空间上的分叉-混沌全图，其中混沌区 $[a_\infty, 4]$ 绝非混乱一片，而是包含着极为丰富的动力学规律。这里主要介绍以下几点。

(1) 倒分叉 混沌区从右到左有一个倒分叉序列，首先是 1 片混

沌(混沌 1 带区),后分叉为 2 片混沌(混沌 2 带区),再顺序分叉为 4 片混沌(4 带区)、8 片混沌(8 带区)、 $\dots$ 、 2^k 片混沌(2^k 带区)、 $\dots$,分叉点都是确定的,形成一个反向的周期为 2^n 的混沌带序列。这种混沌区的周期倍化的倒分叉序列与周期区的正分叉序列相对应,从两个相反的方面收敛到同一参数值 a_∞ ,极具规则性。

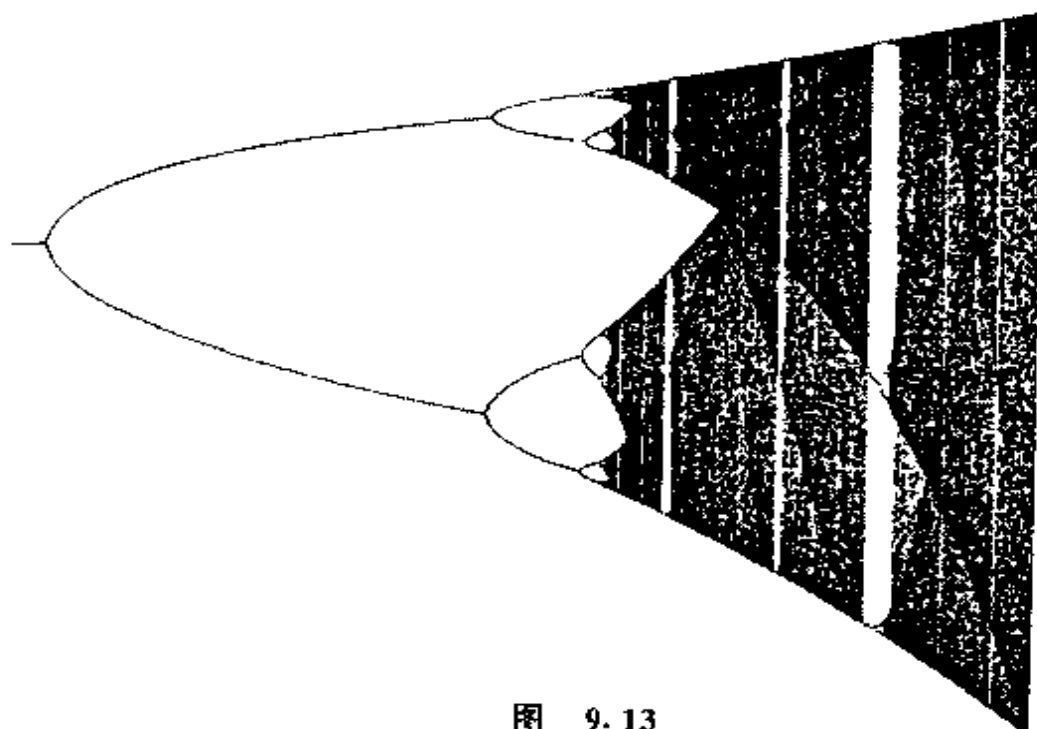


图 9.13

(2)周期窗口 混沌区内存在许多长度有限的小区间,参数 a 在这些小区间取值时系统作周期运动,故称为周期窗口。图 9.13 混沌区内从右向左肉眼可见的有 3 个周期窗口,系统在这里分别作周期为 3、5、7 的有序运动。有趣的是这个混沌区内存在以一切自然数为周期的窗口。这表明,当控制参数 a 在混沌区内变化时,系统并非总是混沌运动,而是交替地采取混沌与周期两种运动体制。周期窗口在混沌区内是严格按照所谓沙道夫斯基序列排列的:

$$\begin{aligned} &3, 5, 7, 9, \dots, 3 \times 2, 5 \times 2, 7 \times 2, 9 \times 2 \dots, \\ &\dots, 3 \times 2^2, 5 \times 2^2, 7 \times 2^2, 9 \times 2^2 \dots, \\ &\dots, 3 \times 2^n, 5 \times 2^n, 7 \times 2^n, 9 \times 2^n \dots, \end{aligned}$$

$$\dots, 2^m, \dots, 32, 16, 8, 4, 2, 1 \quad (9.11)$$

在混沌 1 带区内由右至左主要存在 3、5、7 等一切奇数周期窗口；在 2 带区内主要周期窗口为 3×2 , 5×2 , 7×2 , 9×2 , $\dots$ ；在 2^n 带区内的主要周期窗口为 3×2^n , 5×2^n , 7×2^n , 9×2^n , $\dots$ 。进一步分析还可发现更精致的规律，显示出高度的有序性。

(3) 自相似层次嵌套结构 图 9.13 的混沌区具有层次无穷嵌套的自相似结构，不但混沌区内有周期窗口，周期窗口内也有混沌区，层层相套。图 9.14 是图 9.13 中某部分的放大，与图 9.13 具有相同的结构，也有倍周期分叉正序列和混沌带倒分叉序列。

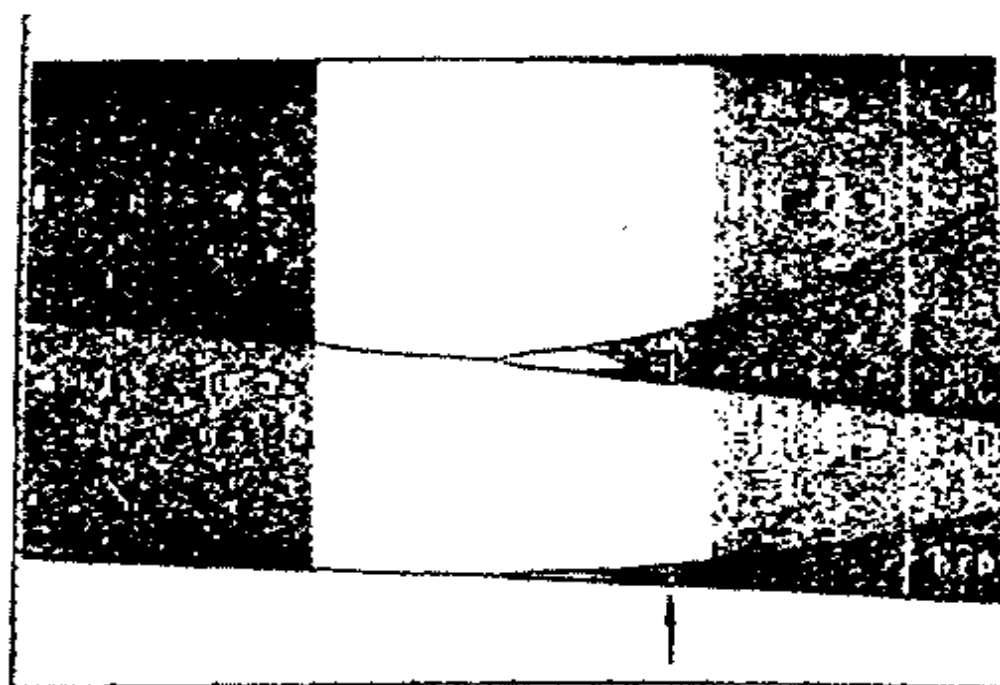


图 9.14

若把图 9.13 的混沌带看作一级的，则从周期窗口中任取一股放大后看到的是二级混沌带。二级混沌带中存在大量三级序列，其中最明显的又是一个“3 点周期”（实际是原系统的 9 点周期）。缩小观察尺度，还可以看到各种更小尺度的混沌带。更精致的数学分析将揭示出这个系统在混沌区的更微妙的自相似性，其规律性之精致令人叹为观止。

(4) 普适性与标度律 上述从图 9.13 中看到的复杂而精致的分叉与混沌特性, 本质上不是逻辑斯蒂方程独有的, 在相当程度上反映了非线性动力学系统的一种普遍存在的特性, 即普适性。同样的分叉与混沌结构出现在一大类不同非线性系统中, 称为结构普适性, MSS 定理为之提供了一种方便的形式化描述。同样的定量特征也可在一大类不同非线性系统中发现, 称为测度普适性。如周期区分叉序列中两个相邻分叉点的距离 $a_n - a_{n-1}$ 随 n 增大而按一定规律收缩, 费根鲍姆发现存在以下极限

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n - a_{n-1}}{a_{n+1} - a_n} = \delta \quad (9.12)$$

δ 代表分叉序列的收敛速率, 可能是一个普适常数, 与映射的具体特性无关。当 $r=2$ 时, 有

$$\delta = 4.66920609 \cdots \quad (9.13)$$

还发现一些别的普适常数。

逻辑斯蒂映射是非常简单的非线性系统, 它的混沌运动尚且呈现如此复杂而精致的有序性, 一般非线性系统的情形更可想而知了。因此, 混沌绝不是简单的无序, 更像是被无序掩盖着的高级有序, 貌似无序的复杂有序, 有人称其为混沌序。

9.8 通向混沌的道路

不论是利用混沌来达到某种目的, 还是为达到某种目的而设法避免混沌, 都需要掌握如何确定一个系统在什么情形下出现混沌, 或者如何从非混沌的运动转变为混沌运动。这就是所谓通向混沌的道路问题。

由于非线性系统的无限多样性, 通向混沌的途径也应是多种多样的, 有人甚至认为条条道路通向混沌。但多样性与普适性、统一性也是一对辩证矛盾, 相信在通向混沌的多种多样道路中存在

某些普适类，是符合科学精神的。就混沌学迄今的发展看，有三条典型的道路是公认的。

(1) 倍周期分叉道路 9.1 节就逻辑斯蒂方程详细讨论的这种通向混沌的道路，也存在于 2 维映射、洛仑兹方程以及其他系统中。其基本特点为

平衡态 $\rightarrow$ 两点周期 $\rightarrow$ 四点周期 $\rightarrow \dots \rightarrow$ 无限倍周期凝聚 $\rightarrow$ 混沌

(2) 准周期道路 这是为解释湍流发生机制提出来的一种混沌发生方式，后来在一些物理系统中得到证实。其基本特点为

平衡态 $\rightarrow$ 周期运动 $\rightarrow$ 准周期运动 $\rightarrow$ 混沌

即系统在准周期运动失稳后转为混沌运动。

(3) 阵发道路 这种通向混沌的道路在数学上与所谓切分叉有关，在物理上涉及某种瓶颈现象。我们不作这方面的分析，仅就图 9.15 作些说明。当动态系统演化到进入狭窄通道时表现为近似的规则运动，走出通道则表现为非周期的随机运动，总体看表现为一阵周期一阵混沌，最后完全转变为混沌。

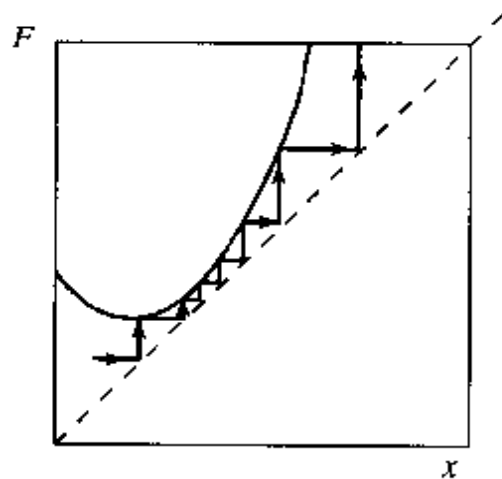


图 9.15

9.9 他组织混沌

上面的讨论都是针对自组织系统的。在最后一节中，我们讨

论他组织混沌。

由于叠加效应,线性系统当且仅当输入混沌的强迫作用时,系统将响应以混沌运动,非混沌的他组织作用不可能使系统产生混沌行为。非线性系统则不然,由于自身的非线性效应,输入非混沌的强迫作用有时可能使系统以混沌运动响应之,输入混沌的强迫作用有时可能使系统以非混沌的运动响应之。不是简单地模仿他组织作用,而是依据自身特点对他组织作用加以吸收、变换、改造,创造具有自己特色的运动体制,是非线性系统具有奇异特性的重要表现。外来作用与自身的特性相结合,创造有自己特色的结构、机制和行为模式,是非线性系统的固有特性。为什么中国现代化不能采取全盘西化的方针,必须走有中国特色之路,这里提供了它的系统学机理。

我们仍以几个具体系统来考察他组织混沌的若干特点。

1960年,正在攻读博士学位的日本学子上田皖亮在研究杜芬方程时已发现混沌,但直到1978年茹勒在日本讲学后才被介绍给世界学术界。这之后,上田对杜芬方程作了深入而系统的研究,使人们对这个他组织系统的动力学特性有了相当完整的了解。讨论以下杜芬方程

$$\ddot{x} + 0.05\dot{x} + x^3 = 7.5\cos t \quad (9.14)$$

以数值积分求解这个方程,在 $x-t$ 平面上画出解的图像。图(9.16)是对初值 $(x=0, \dot{x}=0)$ 作出的,系统经过短暂的瞬变后进入唯一的混沌吸引子。

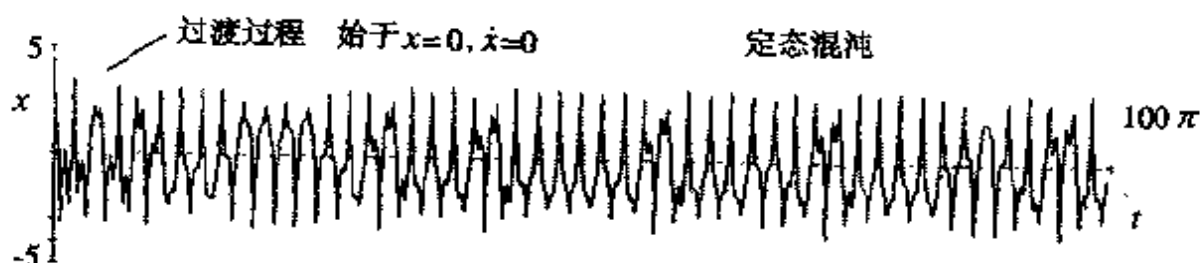


图 9.16

为更清楚地观察这个吸引子定态,图 9.17 略去瞬态过程,增大时间序列到 200π ,

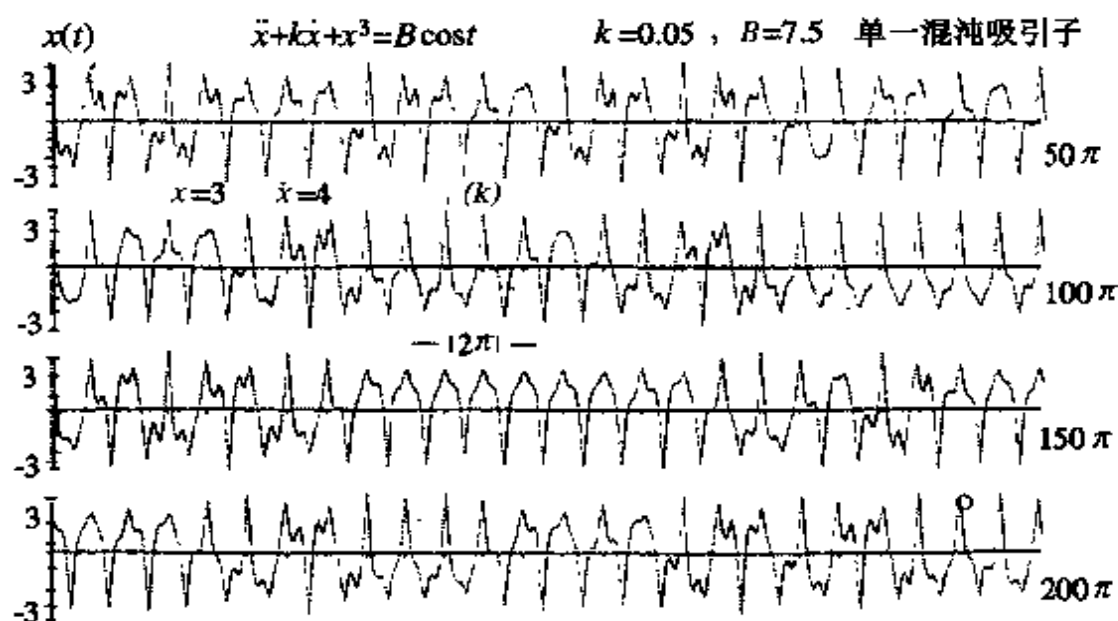


图 9.17

由此图看出这个定态有以下特点:

(1) 有回归性,但不规则,是一种非周期的回归性(波形在不规则的区间上重复自己);

(2) 有随机性,但动力学方程是确定性的,他组织作用 $F(t) = 7.5 \cos t$ 也是确定性的,因而是一种确定性随机性;

(3) 对初值有敏感依赖性,如图 9.18 所示,从两个邻近的初值 $(3, 4)$ 和 $(3.01, 4.01)$ 出发的轨道按指数方式相互分离,开始时几乎是重合的,但很快就有了显著差别。

这些特点确实表明,杜芬方程已进入混沌定态。

杜芬方程描述的是有两个控制参数的系统。杜芬等早期动力学家对方程 (8.2) 的研究限于很窄的参数范围,无法看到它的丰富动力学内容。

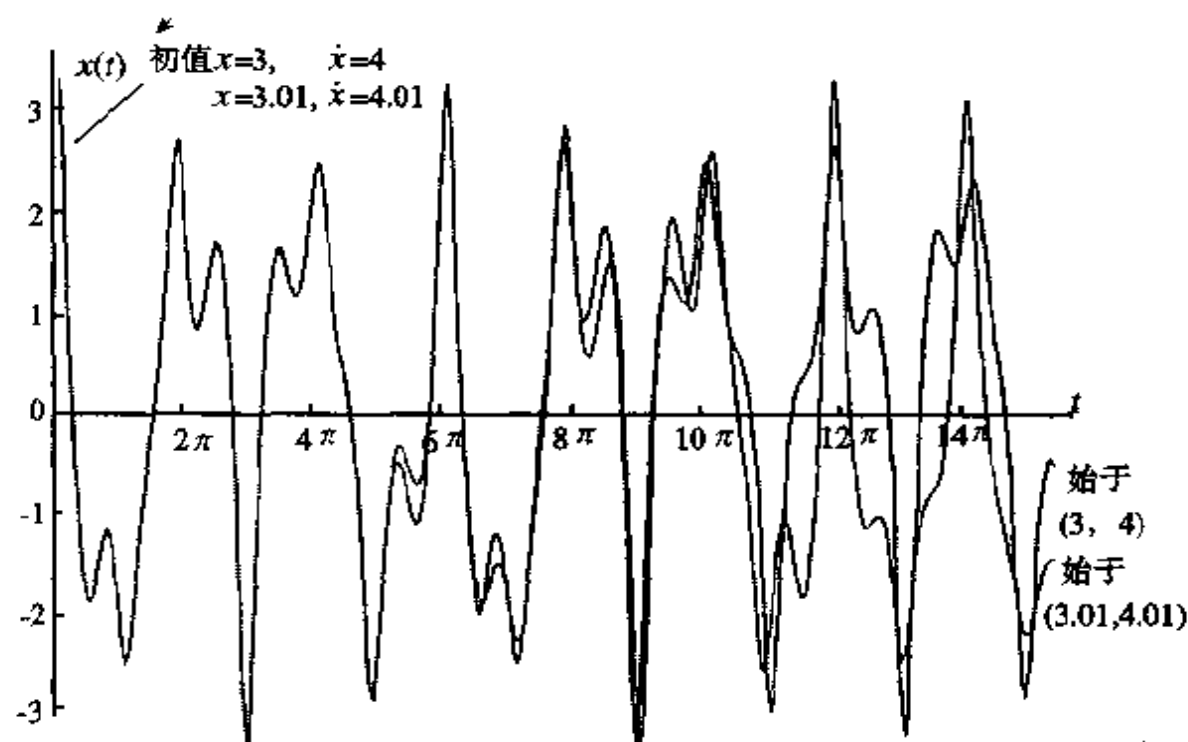


图 9.18

上田晓亮在 2 维控制空间 $k-B$ 平面上全面地考察了杜芬方程，发现可以划分为如图 (9.19) 所示的从 (a) 到 (u) 共 21 个主要区域，系统在这些区域各有不同的动力学特性。(a) 区对应于图 8.5 所示 5 种周期吸引子。画斜线的为混沌区，长线的是单一混沌吸引子，短线的是多吸引子并存的混沌区。(k) 区对应于图 9.16 所示混沌吸引子。弧线为区域间的分界线，是控制参数变化导致系统分叉之处。当控制参数越过这些弧线时，系统就发生定性性质的改变，或从一种周期运动变为另一种周期运动，或从周期运动变为混沌运动或者相反，或从一种混沌变为另一种混沌，或发生稳定性的交换、吸引子的消失，等等。杜芬方程属于不太复杂的系统，尚有如此多样的动力学特性，由此图可以想见一般非线性系统的动力学图像该是多么丰富多彩了。

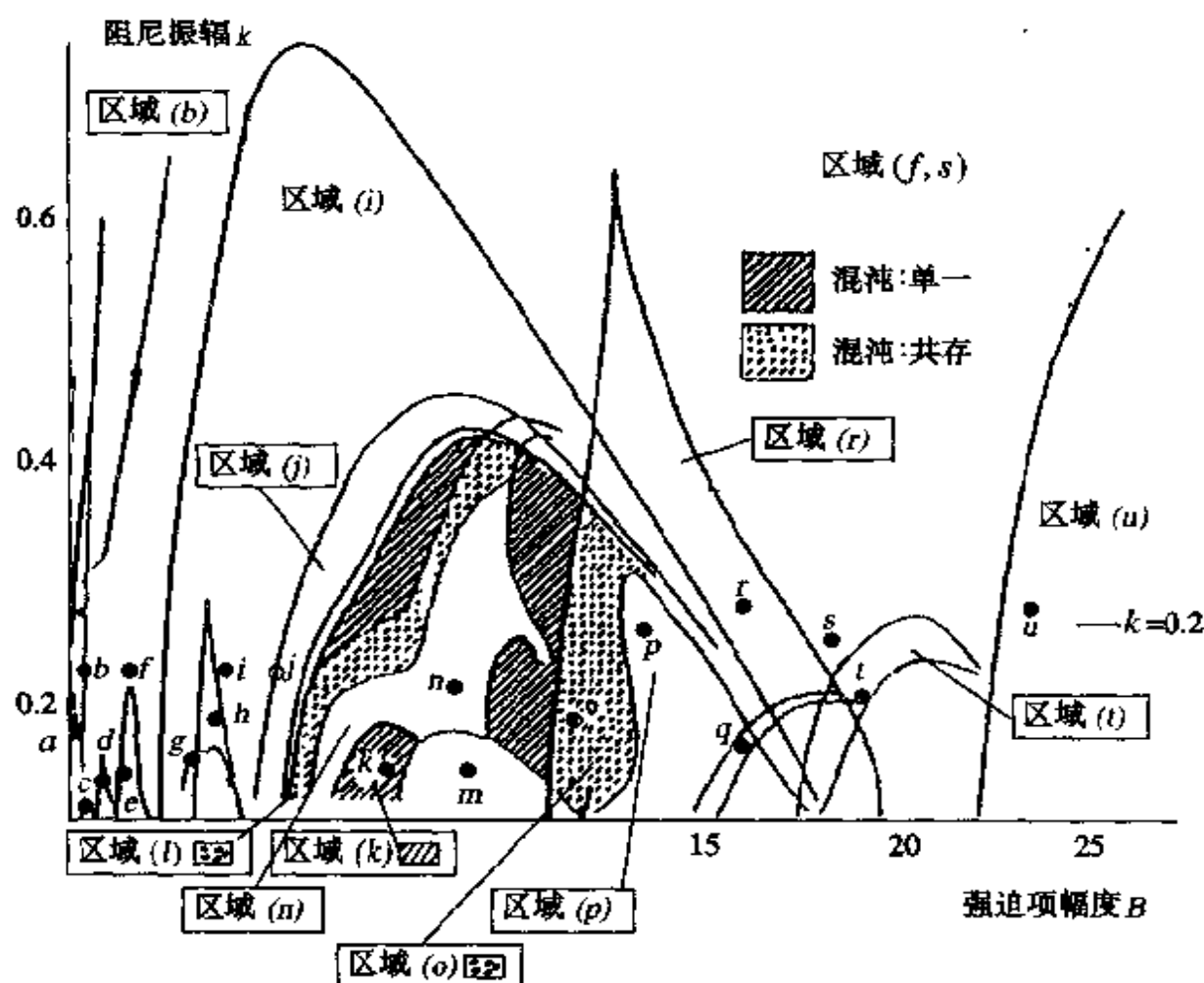


图 9.19

杜芬方程的奇怪吸引子，即日本吸引子，如图 9.20 所示。

范德坡在 40 年代已发现系统 (8.5) 在周期性外力作用下表现出随机行为，由于受传统观点的束缚未予重视，使范氏与混沌擦肩而过。

70 年代以来，范德坡方程成为混沌学关注的对象之一，取得很多成果。

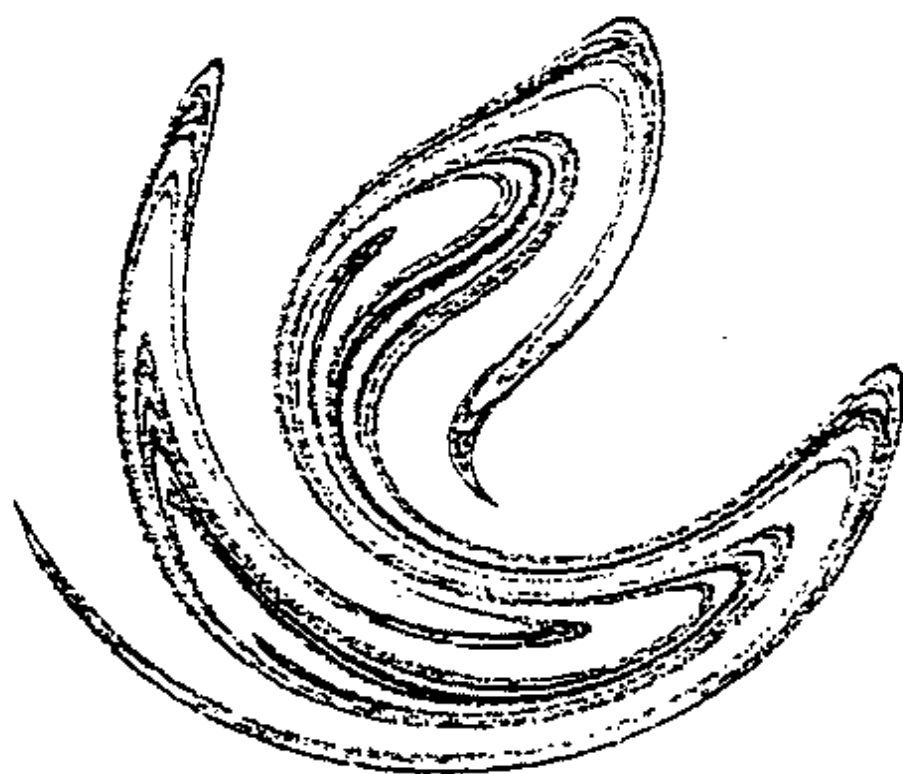


图 9.20

强迫布鲁塞尔器（三分子模型）也可能出现混沌运动，郝柏林作了详细讨论，发现它的奇怪吸引子。还有许多他组织系统的混沌运动也得到研究。这些事实表明，混沌同样是非线性他组织系统的通有行为。

思 考 题

1. 混沌是混乱吗？什么叫“混沌序”？
2. 如何理解“混沌是确定性的随机性”？
3. 什么叫对初值的敏感依赖性？它是怎样产生的？
4. 发现混沌如何“粉碎了拉普拉斯的可预见性狂想”？混沌学又如何扩展了人的预见能力？
5. 如何理解混沌运动是非线性系统的典型行为？

阅 读 书 目

1. 格莱克：《混沌——开创新学科》，上海，上海译文出版社，1990。
2. 苗东升、刘华杰：《浑沌学纵横论》，北京，中国人民大学出版社，1993。
3. 苗东升：《系统科学辩证法》，第9、10章。
4. 刘华杰：《浑沌之旅》，济南，山东教育出版社，1996。
5. 斯图尔特：《上帝掷骰子吗——混沌的数学》，上海，上海远东出版社，1995。

第 10 章 开放的复杂巨系统理论

钱学森近年来大力倡导的开放的复杂巨系统理论，代表系统科学前沿的一个新领域。由于问题难度大，研究历史短，尚无明确的体系框架。迄今的主要工作是分别就几类具体的开放复杂巨系统进行研究，属于系统科学与思维科学、地理科学、社会科学等领域的交叉。本章拟结合背景分析和历史的考察来介绍它的内容，以帮助读者理清其思想发展脉络。

10.1 复杂性研究概述

第二次世界大战结束后的事态发展，日益表明我们正处于科学发展史上的一个大转折时代。这就是从经典的机械论科学向新兴科学的转变，或按普利高津的说法，是从简单性科学向复杂性科学的转变。从 40 年代起，世界科学界对复杂性的探索已历时半个多世纪，方兴未艾，更大的高潮还在后头。

复杂性探索的第一次重大努力，归功于现代系统研究的开创者们。贝塔朗菲指出，一般系统论以至整个系统研究兴起的现实背景，是现代的技术和社会已变得十分复杂，以至于传统的方式和手段不再满足需要，“我们被迫在一切知识领域中运用‘整体’或‘系统’概念来处理复杂性问题”^①。一般系统论就是他为处理

^① 贝塔朗菲：《一般系统论——基础、发展和应用》，2 页，北京，清华大学出版社，1987。

复杂性问题准备的理论工具。控制学家阿希贝提出“研究复杂系统的战略”，指明对于复杂系统“不能指望有一种理论可以达到牛顿理论的那种简单性和精确性”^①。从科学思想和科学哲学的角度看，这个时期复杂性探索的最高成就集中体现于信息学家魏沃尔的著名论文《科学与复杂性》。文中区分了简单性和复杂性，把复杂性划分为两类，即无组织的复杂性和有组织的复杂性，认为19世纪主要发展的是简单性科学，20世纪前半期主要发展的是关于无组织复杂性的科学，即建立在统计方法上的那些学科，而未来50年的科学将主要研究有组织的复杂性，电子计算机和系统方法是它的强有力工具。这些观点对以后的科学发展产生了很大影响，直到今天仍然可以明显地感觉到它。

复杂性探索的真正高潮始于70年代产生的自组织理论。普利高津、哈肯、艾根断言复杂性是物质世界自组织运动的产物，坚持以自组织为基本概念揭示复杂性的本质和来源。艾根特别研究了生物复杂性的起源，阐述在宇宙的化学进化阶段产生的大分子基础上，如何通过超循环这种自组织机制克服信息危机，产生出最初的生命细胞，从而阐明生物复杂性是如何从物理简单性中产生出来的。哈肯把复杂系统作为协同学的研究对象，认为“由大量数目的部分所构成”和“具有复杂的行为”是这种系统的两个基本特征^②，试图推广信息论，以代数复杂性为基础定义一般复杂性，把复杂性研究的要点归结为对复杂系统空间的、时间的或功能的结构变化，提供以统一观点处理复杂系统的概念和方法。从科学思想和哲学的角度看，这个时期更深刻的工作属于普利高津学派。他们从科学转型的历史高度审视问题，断定现代科学在一切层次上都遇到复杂性，主张“结束现实世界简单性”这一传统

① 艾什比（阿希贝）：《大脑设计》，34页，北京，商务印书馆，1991。

② 哈肯：《信息与自组织》，10页，成都，四川教育出版社，1988。

信念，倡导把复杂性当作复杂性来处理，建立复杂性科学。在具体操作上，他们以耗散结构为基本概念，论证在远离平衡态的条件下，物理系统由于出现耗散结构而产生“最低限度的复杂性”，为后来进化出生物复杂性和社会复杂性提供了物理学前提。主要由于他们的工作，人们理解了复杂性是从物理到生物、从自然到社会、从实体到心灵的领域普遍存在的，差别只在于复杂性的形式、程度、层次的不同。

在80年代末以来的西方复杂性研究中，圣塔菲研究所的工作最引人注目。这个由诺贝尔物理学奖得主盖尔曼（M. Gell-Mann）等人发起的研究集体，吸引了一批科学大家参与。他们的目标是建立能够处理一切复杂性的一元化理论，主要手段是计算机模拟。但是，关于是否存在这种一元化的理论，计算机得到的结果是否都是关于自然的东西，圣塔菲的学者之间（更不必说其他学者）一直有激烈争论。从科学哲学的角度看，建立一门处理一切复杂性的一元化理论的目标很不现实，复杂性科学是未来科学的总称，而不是一门新学科。要给复杂性以统一而精确的定义，至少目前是不可能的。这些问题正是导致他们感到“困惑”^①的原因。但圣塔菲学派的成绩卓著，他们发展的演化经济学已纳入主流经济学中，关于人工生命、复杂适应性系统、免疫系统、Hopfield 联想记忆模型等子领域的研究，深化了学术界对复杂性和复杂性科学的理解。他们提出的“混沌边缘”概念和复杂性来自混沌边缘的观点，关于处理复杂系统问题的AN（自动机网络）方法，都很有价值。钱学森认为：“在面对一个开放的复杂巨系统，要是专家们还不熟悉，对其整体客观行为毫无把握，那么AN方法不失为一得之见”^②。

① John Horgan:《复杂性研究的发展趋势——从复杂性到困惑》，载《科学》（重庆），1995（10）。

② 钱学森1993年7月27日致戴汝为的信，载《自然杂志》，17卷2期。

80年代末以来,钱学森提出开放的复杂巨系统概念,制定了研究开放的复杂巨系统的可行方法,带领我国一批学者开展多方面的开拓性研究,取得重要成果。这是钱学森近20年来从事系统科学研究的逻辑延伸,也是他总结和借鉴国内外有关复杂性研究的结果。与国外同行相比,钱学森关于复杂性的研究有几个显著特点:其一,以马克思主义哲学、特别是《矛盾论》和《实践论》为指导;其二,把复杂性研究纳入建立系统学、完善系统科学体系的工作中,明确地用系统概念解释复杂性;其三,以给中国社会主义事业的发展提供科学理论和实行方法为目标研究复杂性。开放的复杂巨系统理论开辟了研究复杂性的一条独特途径,体现了现代科学成就与中国古代文明的精华、现代中国革命和建设成功经验的结合。

10.2 系统的新分类

给对象以正确的分类,把握不同类对象的特殊矛盾和特殊运动规律,是科学研究取得成功的关键。完备的分类是建立完备的学科体系的前提。系统科学也如此。大体上说,有两种系统分类方法。一种是非系统科学的系统分类,如按组分的基质特性划分,有物理系统、生物系统、社会系统,或物质系统与心理系统,实体系统与符号系统,等等。这种分类比较直观,贴近现有学科分支的思路,适于应用系统科学解决其他学科中的问题。但由于它的着眼点过分放在系统的具体含义上,反而失去系统的本质。如果一部著作或教科书是按物理系统、生命系统、地理系统、军事系统、社会经济系统分章阐述的,尽管它对系统科学的发展可能很有价值,仍不能算作系统科学的著作,而属于系统科学的应用即交叉领域的作品。本来意义上的系统科学著作不应采取这种逻辑框架。

系统科学关于系统的分类应突出的是对象类型的系统意义,

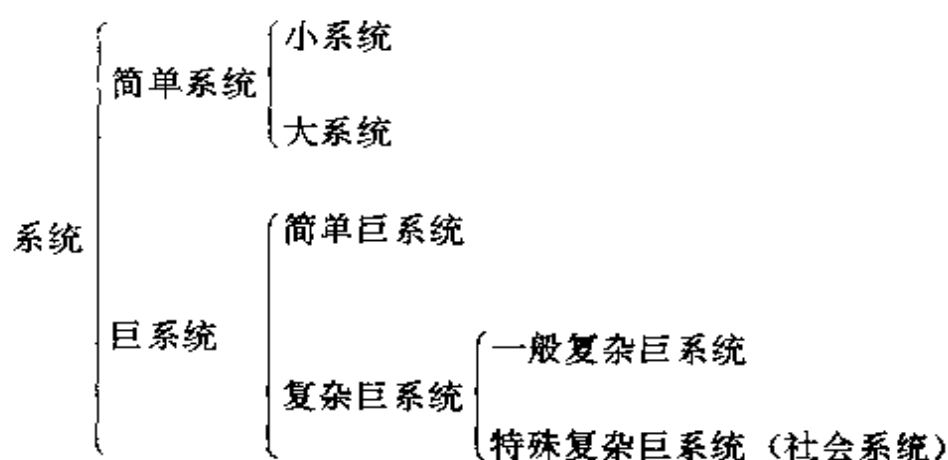
即撇开组分的具体基质特性和组分之间相互作用的具体特性，仅仅把对象作为系统来区分。例如，封闭系统与开放系统，静态系统与动态系统，有控制的系统与无控制的系统，就属于系统科学的系统分类。如果侧重于考察系统模型的数学性质，系统科学还有线性系统与非线性系统、离散系统与连续系统、确定性系统与不确定性系统、定常系统与时变系统等划分。系统科学各分支还有更细致的系统分类。但强调分类的系统意义，是系统科学有别于其他学科的基本特点。

上述系统分类都是按一定标准给出的两分式划分，不是完备的系统分类。由于除一般系统论和正在建立中的系统学之外，系统科学的其他分支都是从某个特定角度观察系统现象而建立起来的，无须考虑系统的完备分类问题。贝塔朗非生前并未明确提出关于系统的完备分类的学科任务。但系统科学发展到今天，为建立它的完整学科体系，特别是建立系统学这门基础理论，给出系统的完备分类已成为必须解决的课题。克勒认为：“系统科学中首批要完成的最重要任务就是发展一种恰当的系统分类学”，“一种有实用价值的可靠的系统分类学理应把在各种传统的科学学科、工程和人类投入力量的其他领域被证明是有用的系统类别都考虑到。”^①克勒从60年代开始探讨这个问题，最后形成所谓GPS系统分类学。这是一种系统认识论型的等级体系，最低层次是源系统（层次0），然后顺序为数据系统（层次1），生成系统（层次2），结构系统（层次3），元系统（层次4），元元系统（层次5），……。克勒系统分类的思辨色彩太浓，与系统科学的实际发展脱节，很难成为实际研究工作的有效工具，因而是不成功的。

70年代末以来，为解决有关建立系统科学体系和系统学的问题，钱学森一直在探讨系统分类问题。他对系统分类的哲学依据

^① G. J. 克勒：《信息社会中二维的科学的出现》，载《哲学研究》，1991（9）。

是毛泽东的矛盾学说。“科学研究的区分，就是根据科学对象所具有的特殊矛盾性。”^① 每门具体科学关于研究对象的分类，应以对象本身的客观性质为依据，不应以人的认识层次为准则。钱学森是在研究各种具体系统中提出分类问题的。他十分关心人脑系统、人体系统、社会系统、地理系统的研究，特别是中国改革开放和发展问题的研究，希望寻找一个恰当的科学概念来概括这些具体系统的共性，以便完全从系统的角度把握这些对象。通过多年探索，他给出如下系统分类：



显然，这是典型的系统科学分类，也是一种完备的系统分类。

10.3 巨系统

早期系统科学（一般系统论除外）研究的系统，只有少量（往往只有几个）基本环节或元件，规模很小。随着被研究系统的规模逐步增大，60年代提出大系统概念，建立了大系统理论，把从前研究的对象称为小系统，或中小规模的系统。大系统理论发现，系统规模的增大会引起系统性质上的某些改变，增加理论分

^① 《毛泽东选集》，2版，第1卷，284页，北京，人民出版社，1995。

析和工程处理的困难。认识到系统规模是决定系统性质的重要因素，提出按规模大小对系统分类，是对系统科学的一个贡献。但并未提出按规模给出系统完备分类的问题。贝塔朗菲在 60 年代考虑过由巨量元素组成的系统问题，认为系统科学、特别是一般系统论需要研究的主要就是这类“巨数”问题。但他没有进一步引申到系统的新分类问题，未能提出相应的概念。

70 年代的系统科学界对规模大小影响系统性质这一点有了更深入的认识，开始考虑比一般大系统规模更大的系统问题。钱学森在应用系统理论解决实际社会问题的探索中接受了按规模大小划分系统的观点，提出“巨系统 (giant system)”概念。他在论述社会系统工程时指出：“这不只是大系统，而是‘巨系统’，是包括整个社会的系统”^①，强调这类问题的范围和复杂程度是一般工程系统所没有的。

钱学森最先注意到的巨系统是社会系统，考虑的是中国社会主义建设的实际问题。建立系统学的需要使他意识到必须从系统工程的范围中走出来，在更大的视野中考察。在研究了贝塔朗菲、普利高津、哈肯、艾根等人的著作后，发现他们的自组织理论研究的也是巨系统。像贝纳德流、激光器之类物质系统，包含的微观组分数在 10^{23} 数量级，是最典型的巨系统。此外，人的大脑，人的躯体，动物躯体，人类生存的地理环境，以至整个宇宙，都是巨系统。这表明，巨系统的存在十分广泛，在客观世界的各个领域都可以发现，在人类生活的宏观层次上尤其普遍。

由此断定，单纯按规模大小划分系统，应有小系统、大系统和巨系统三个类别。这也是一种完备分类。但系统规模是一个含义不大明确的概念，有多种定义。德林尼克曾试图使之精确化，提出“假定一个系统的规模是用参数 N 表示其‘大’，……。 N 可

^① 钱学森等：《论系统工程》，增订本，32 页。

以代表构成它的分系统（或组成部分）的数目，或是数学表示法中的变数数目，或其他的含义”^①。如此界定的系统规模仍有不确定性，小系统与大系统之间，大系统与巨系统之间，仍然不存在截然分明的界限。钱学森也主张按组分数目表示系统规模。鉴于这种不确定性，他认为只能相对地加以区分：组分只有几个、十几个的是小系统，组分为几十个、上百个的是大系统，组分成万、上亿、上百亿、万亿的是巨系统。这种划分当然也是模糊的。

大系统与小系统相比，尽管出现许多新现象，增加了理论描述和实际处理的难度，但总的说来还没有全新的质变，仍然有路可寻。从大系统到巨系统这一步，单纯的规模增大将导致系统出现全新的性质。钱学森指出：“量变可以引起质变：H. Haken 等人的协同学（Synergetics）证明这是可能的，即巨系统的统计理论说明巨系统中会出现简单系统中没有的现象，如自组织现象。”^② 小系统和大系统只有平凡行为，巨系统可能表现出许多非平凡行为。描述这类系统需要新的概念框架，建立巨系统理论。耗散结构论、协同学、超循环论都是巨系统理论，它们的理论框架是不可能从考察大系统现象而得到的。描述大脑、人体、社会、地理环境以至整个宇宙，都需要用巨系统概念。

大系统理论是一门技术科学，介于系统学和系统工程之间，一般归于控制学。巨系统理论属于系统研究的基础科学。耗散结构论无疑是基础科学，但明显地依赖于物理学脚手架，尚不属于系统科学要建立的巨系统理论。甩开一切脚手架，建立仅仅从系统观点来描述和处理巨系统问题的理论，就是系统学。

不同的对象要求用不同的研究方法。钱学森提出一个具有重

① R. F. Drenick, Large-Scale System Theory in the 1980's, Large Scale System, 1982(2), p. 29.

② 钱学森等：《论系统工程》，增订本，270页。

要方法论意义的看法：应当“搞清大系统与巨系统的区别，大系统控制论是不能直接用来解决巨系统问题的”^①。处理小系统和大系统的经典系统理论仍大量使用还原方法。但系统规模越大，还原方法越难奏效，越需要运用系统思想从整体上认识和解决问题。这是协同学等巨系统理论与大系统理论的主要区别之一。描述巨系统，关键之一是用自组织概念。一切巨系统都是自组织系统，其行为都是自组织运动。物理、化学、生物巨系统如此，大脑、社会、地理环境等巨系统也如此。在社会经济系统中，高度集中的计划经济之所以失败，就在于它是按照大系统理论的递阶控制原理（见 12.8 节）管理经济运动这种巨系统，经济人不能自主的经营管理，严重压制了商品经济的自组织运动。但社会经济运动不能完全排除他组织因素，企业内部严格的计划管理也是必须的，国家施行一定的宏观调控是必须的，现代世界甚至需要某种超国家的、全球范围的调控。排除一切宏观调控（他组织）的市场经济，已被证明是一种有严重弊病的过时模式。

巨系统概念是一个新的认识工具，代表一种新的研究方法。钱学森反复强调“用巨系统观点研究人”^②。这同样适用于其他巨系统：用巨系统观点研究人体、大脑、经济、生态等等。总之，巨系统概念的提出代表系统方法的一个新水平，系统思想的一个新层次。

10.4 复杂巨系统

80 年代前半期，钱学森对普利高津、哈肯、艾根等人的理论成果寄予厚望，相信有了巨系统、自组织等概念，把已有的系统理论融会贯通，综合起来，建立统一的理论框架，就可以有效地

① 钱学森：《大系统理论要创新》，载《系统工程理论与实践》，1986（1）。

② 钱学森：《人体科学与当代科学技术发展纵横观》，157 页，北京，中国人体科学学会。

描述和处理各种巨系统问题。这导致他关于建立系统学的努力。但建立系统学的实践表明，这个估计过分乐观了。

哈肯等人的理论是以贝纳德流、三分子模型、激光器之类系统为背景建立起来的，处理的主要是物理化学巨系统，能给出精确的定量结果。应用于生物、社会巨系统时，一般得不到这种精确定量的结果，多半是在隐喻的意义下使用的。钱学森的巨系统概念是在应用系统工程、运筹学和控制学研究社会问题时提出来的。他指出：“巨系统的特点有两个：一是系统的组成是分层次、分区域的，即在一个小局部可以直接制约、协调；在此基础上再到几个小局部形成的上一层相互制约、协调；再在上还有更大的层次组织。”^①这显然是以社会系统为背景进行概括的，用于生命系统亦成立，但与激光器一类巨系统颇为不同。自组织理论研究的物理化学系统，微观层次与宏观层次界限分明，原则上不存在中间层次，可以从微观直接过渡到宏观。这表明，多层次结构并非一切巨系统的基本特征，不同巨系统之间仍有质的差别，不可能用统一的理论对所有巨系统作出同样有效的解释。巨系统仍有不同的类别，需用不同的系统理论描述。

不同巨系统之间在规模上仍可能有显著区别。例如，贝纳德流作为物理系统有 10^{23} 数量级的微观组分，社会系统的规模要比它小得多。中国是世界上最大的社会系统，微观组分（个人）有 12 亿之多，但也不过 1.2×10^9 ，小 14 个数量级。两者相比，前者似乎应称为“超级巨系统”。但众所周知，后者的描述比前者困难得多，至今没有可用的理论。大脑作为系统，在空间占有上十分有限，应是小系统；若从行为特性看，是至今仍无适当处理方法的巨系统。这些事实表明，在巨系统这个等级上，再按规模大小进行分类已无实际意义，“超级巨系统”并非一个很有价值的概念，

^① 钱学森等：《论系统工程》，增订本，33 页。

不能提供新的系统思想。应该寻找新的标准对巨系统进行分类。第二章指出，系统的内在规定性由元素与结构两方面决定。元素之间、子系统之间的相互作用可能单纯，也可能复杂多样。这是造成系统特性和行为显著不同的更重要的根源。按结构的复杂程度进行分类，可以更好地把握系统。巨系统尤其如此。这是 80 年代兴起的复杂性研究提供的重要启示。

系统的规模大小与复杂性之间有某种联系。规模很小的系统谈不上复杂性，人们总有办法把它的结构和特性描述出来。只有巨系统才可能产生真正的复杂性。但规模巨大只是产生复杂性的必要条件。即使元素和子系统的数目巨大，只要“花色品种”很少，相互作用单纯，系统的结构就不会复杂。协同学等处理的对象主要就是这种系统。例如，贝纳德流作为系统，元素是同种液体的分子，尽管数量极大，但相互关系十分简单，可以用热运动和分子相互作用来描述，借助数学方法直接从微观过渡到宏观，建立系统的运动方程。这类规模巨大但结构和行为简单的对象，钱学森称之为简单巨系统。

如果元素和子系统不仅数量巨大，而且“花色品种”繁多，相互作用必然复杂。组分种类的多样性和差异性，是产生结构复杂性的主要根源。这类对象与上述简单巨系统有显著区别。组分数目巨大、种类繁多、彼此差异显著的系统，必须按等级层次方式组织起来，除元素层次和系统整体层次外，还有大量中间层次，不同层次之间又有相互联系、制约、过渡的问题。钱学森作过这样的描述：“巨系统内部是有层次的，一个层次一种运动形式，高一层次就有高一级的运动形式，因而各层次性能也不同。高一级层次常常会出现较低一级层次所没有的性质，再高一层又有新的性质。”^① 多层次是复杂性的又一重要根源。在多层次系统中，知道

^① 钱学森等：《论系统工程》，增订本，353 页。

了下一层次的情况并不能立即知道上一层次的情况，尤其不能苛求从最低层次的情况直接了解系统整体的情况。有些系统甚至连有哪些层次也不清楚，更难于作理论分析。钱学森把这类对象称为复杂巨系统。大脑、人体、生物机体、社会、地理环境、整个宇宙都是复杂巨系统。

复杂巨系统仍然有不同的类别，彼此在特性、行为和描述方法上有重要差别。作为社会系统最小组分的个人，本身就是复杂系统，具有自觉的能动性，情感、意志、智慧等因素使人的行为具有很大不确定性。社会系统具有极其多样又差异很大的子系统和等级层次，子系统之间有各种方式的通信联系，形成极其复杂的通信网。个人和社会子系统都具有学习能力，通过学习获得知识，不断进步，他们掌握知识的状况对社会系统的行为有重要影响。个人或各种层次的社会子系统都是动态的实体，其结构、特性、行为、功能都处于不断变化中。社会是一种具有极强记忆性或历史性的系统，过去的行为状态和历史传统对系统的未来有极大的影响。社会信息化使社会系统中包含大量机器子系统，形成复杂的人-机关系。所有这一切，造成社会系统独有的复杂性。因此，钱学森把社会看作特殊复杂的巨系统，以区别于人体等一般复杂巨系统。

10.5 开放的复杂巨系统

前面几节单就系统规模和结构来刻画复杂性，显然有局限性。如第二章所说，完整的系统规定性还包含外部环境对系统的制约和影响。系统处于怎样的环境中，环境超系统是否复杂，系统开放的方式和程度，系统与环境相互作用的方式，都直接影响或规定着系统的复杂性。普利高津等强调开放性是自组织产生和维持的必要条件，但没有从复杂性的增减方面讨论对外开放如何影响系统特性，对于他们研究的简单巨系统，环境的影响非常简单

(不考虑系统对环境的影响), 可以用控制参量的变化来描述。复杂巨系统难于这样做。一个系统从封闭转向充分开放, 必定显著增加其复杂性。中国社会改革开放前后的巨大差别是一典型事例。对于复杂巨系统, 开放将引起每个组分发生相应的变化, 产生许多新的子系统以便管理系统与环境的交换活动, 从而导致整个系统运行机制、行为方式和功能效益的改变。基于这些考虑, 钱学森进一步提出开放的复杂巨系统概念, 认定研究这种系统构成一个新的科学领域。

系统科学初创时就强调开放性, 开放理论是一般系统论的主要支柱之一。但钱学森重新强调开放性有特定含义。这不仅凝结了他对中国改革开放的丰富实践内容的系统学反思, 也体现他对开放性概念的拓展, 特别强调社会系统中组分及子系统与外部环境交换信息, 通过开放获取信息, 不断进化。这些特性对于认识和处理复杂巨系统问题很有价值。

钱学森在 1989 年提出开放的复杂巨系统概念后, 很快引起他的学生、人工智能专家戴汝为的注意。从 1990 年起, 他与钱学森、于景元合作研究开放的复杂巨系统, 并把这个概念引入人工智能领域, 开辟 AI 研究的新思路。80 年代初, 美国人工智能专家 Hewitt 等人着手清理传统 AI 的封闭系统思路, 在 AI 领域提出开放系统概念。1991 年, 他们又提出“开放系统科学”的概念。^① 国内外的这些动向并非巧合, 它反映系统科学发展的一种新动向, 以及系统科学与人工智能的相互交叉。

从开放的复杂巨系统理论的发展过程看, 三个限制词巨(型)的、复杂的、开放的是逐步加上的: 1978 年提出巨系统概念,

^① Carl Hewitt, Jeff Inman: DAI Betwixt and Between: From “Intelligent Agents” to Open System Science, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 21, No. 6, 1991。

1987 年提出复杂巨系统概念，1989 年提出开放的复杂巨系统概念。三个限制词并非简单的叠加，它们代表钱学森关于系统概念的认识的三次飞跃：

巨系统→复杂巨系统→开放的复杂巨系统

实际复杂巨系统都是开放的，因而开放的复杂巨系统的存在相当普遍。但就目前认识水平看，主要是六种：宇宙系统，地理系统，生物圈系统，社会系统，人体系统，大脑系统。它们之间有如图 10.1 所示的嵌套关系。这些系统都可以从不同角度划分子系统。原则上讲，与母系统同维的子系统也是开放的复杂巨系统。例如，在社会系统中，经济、政治、文化乃至军事对阵等子系统均为开放的复杂巨系统。

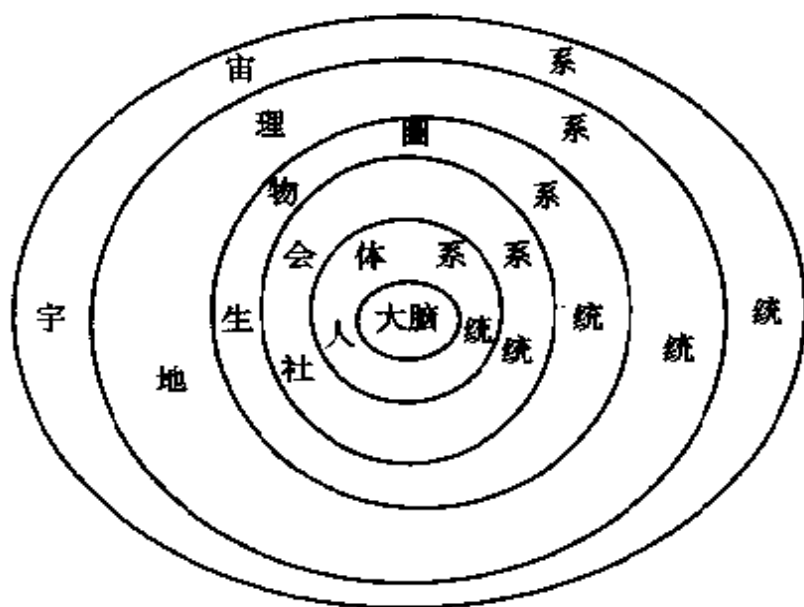


图 10.1

对开放性的深入研究，导致钱学森按照系统与环境关系对巨系统作出如下完备分类：

- (1) 简单环境中的简单巨系统，如贝纳德流，激光器；
- (2) 复杂环境中的简单巨系统，如智能机器人，环境复杂多变，系统却是简单的；

(3) 简单环境中的复杂巨系统,如人体系统,人脑系统,对国际社会交往极少的封闭社会,在研究问题的一段时间内环境变化不大,可看作简单的环境;

(4) 复杂环境中的复杂巨系统,如今天改革开放中的中国社会及其国际环境都是极其复杂的。

10.6 复杂性的定义

在科学发展史上,简单性与复杂性一直是在相比较的意义上使用的一对概念,没有给出精确的界定。通常认为,一个问题简单的还是复杂的,只能相对地区分,没有找到解决办法的问题是复杂的,一旦认识了它的特殊性质,找到解决办法,就是简单的了。但复杂性研究的兴起迫使人们不再满足这种理解,力求给出复杂性的严格定义。而复杂性是很难定义的概念,不同学者给以不同的表述。L. Loyd 收集了复杂性的 31 种定义方式^①,它们是:

熵: 复杂性等于热力学测定的一个系熵或无序;

信息: 复杂性等于一个系统使一个观察者“惊奇”(即通知他)的能力;

分形尺寸: 复杂性是一个系统的“模糊状况”,即在越来越小的尺度上显示的详细程度;

有效的复杂性: 一个系统显示的“规律性”(而不是随机性)的程度;

体系的复杂性: 由一个体系结构系统的不同层次所显示的多样性;

语法的复杂性: 描述一个系统所需要的语言的普遍性程度;

^① 转引自 John Horgan:《复杂性研究的发展趋势——从复杂性到困惑》,载《科学》(重庆),1995(10)。

热力学深度：将一个系统从头组织在一起所需要的热力学资源数量；

时间计算上的复杂性：一部计算机描述一个系统（或解决一个问题）所需要的时间；

空间计算上的复杂性：描述一个系统所需要的计算机存储量；
相互的信息：一个系统的一部分载有关于其他部分的信息量的程度，或者与其他部分的类似程度。

等等。

显然，这些定义都有很大的局限性，只能在特定的范围内获得有效应用。

如何定义复杂性同样是钱学森在阐述开放的复杂巨系统概念时遇到的一大难题。经多年思索，他从系统学观点给出一个定义：“所谓‘复杂性’实际是开放的复杂巨系统的动力学”^①。从字面看，他的提法有用复杂性定义复杂性的逻辑毛病。但这个逻辑毛病是可以消除的。这个定义的价值在于指明复杂性是一类系统的属性，应按系统学观点下定义。这类系统的特点是：（1）巨型性，即元素极多，规模巨大；（2）内在差异性，元素“花色品种”很多，元素间关联方式差异显著；（3）层次性，具有很多中间层次，有哪些层次有时并不清楚；（4）开放性，与环境有多种多样的、强烈的相互作用；（5）动态性，系统的组分、结构、特性以及环境的特性都在不断变化。规模巨大、组分差异显著、层次众多、对环境开放的系统的动力学特性，就是复杂性。

10.7 系统集成方法

简单系统可以通过对组分的数学模型直接综合而得到系统的

^① 王寿云等：《开放的复杂巨系统》，286页，杭州，浙江科学技术出版社，1996。

数学模型，我们将在第 12 章中讨论。简单巨系统不能用这种直接综合的方法，但可以用统计方法从微观过渡到宏观，建立系统的数学模型。协同学对此有很好的说明。现代科学没有提供从复杂巨系统的微观描述过渡到宏观描述的统计方法，更不能从直接综合微观组分描述中得到系统的宏观描述。因此，开放的复杂巨系统属于没有理论方法的研究对象。硬性套用解决简单巨系统问题的理论和方法去解决开放的复杂巨系统问题，不是科学的态度，也是无济无事的。

但开放的复杂巨系统是人们在实际生活中天天都在接触的，实践着的人们从不同方面取得有关这些系统的经验知识，积累了大量信息和统计资料，特别是各行各业专家的经验、直觉和判断力；现代科学的不同分支也从不同侧面研究了这些系统，还原到基础层次对它们作出描述，积累了大量知识。现代信息技术，特别是计算机技术，极大地提高了收集、存储、处理信息的能力，以及在计算机上模拟大规模复杂过程的能力。从唯物主义认识论看，具备这些条件，人类原则上就能够处理开放的复杂巨系统问题。关键是如何运用这些信息、资料、经验、知识和技术去获得有关复杂巨系统整体的全面而深入的认识，即解决开放的复杂巨系统的方法论问题。

随着计算机和人工智能技术的发展，一些人提出建立所谓自主的人工智能系统，期望完全依靠巨型智能机解决复杂巨系统问题。事实证明这是行不通的。解决开放的复杂巨系统问题只能实行人-机结合、以人为主的技术路线。这也是个方法论问题。

钱学森认为，解决开放的复杂巨系统问题目前唯一有效的办法，就是使用从定性到定量的综合集成法，简称综合集成（meta-synthesis）。其要点如下：

（1）直接诉诸实践经验，特别是专家的经验、不成文的感受、判断力，把这些经验知识和现代科学提供的理论知识结合起来，甚至与前人或古人的知识结合起来；

(2) 专家的经验是局部的、多半是定性的，要通过建模计算把这些定性知识和各种观测数据、统计资料结合起来，实现从局部定性的知识达到整体定量的认识；

(3) 把人与计算机结合起来，充分利用知识工程、专家系统、智能机器长于逻辑运算、速度快、容量大、不怕疲劳等特点，同时发挥人脑的洞察力、长于形象思维的优点，使两者取长补短，相互激发，产生出更高的智慧。

综合集成的实质是专家经验、统计数据和信息资料、计算机技术三者的有机结合，构成一个以人为主的高度智能化的人-机结合系统，发挥这个系统的整体优势，去解决问题。对开放复杂巨系统的综合集成要以人类积累的全部知识为基础来进行，要在整个现代科学知识体系中作大跨度的跳跃，实行“泛化”思维^①，集大成，得智慧。钱学森称其为大成智慧。在哲学上，就是把经验与理论、定性与定量、人与机、微观与宏观、还原论与整体论辩证地统一起来。这是方法论层次上的综合集成，是系统科学方法最概括的表述，因为一切系统方法均可作为它的特殊情形。至于作为具体操作方法的综合集成工程，我们将在最后一章予以讨论。

开放的复杂巨系统理论和综合集成方法提出的时间很短，一些问题尚待研究。

例如：(1) 基本概念“开放的复杂巨系统”有待进一步界定，“种类多”、“差异大”、“多层次”等用语太含糊，“大”与“巨”之间难以给出确切界限（像军事对阵问题，钱学森学派有时讲大系统，有时又讲巨系统），但如宋健所说，相对精确的界限还是应当有的；

(2) 综合集成法成功强烈依赖于专家经验，这是它的优点，

^① 王寿云等：《开放的复杂巨系统》，300页。

也是它的局限性所在，如果复杂巨系统工程刚刚兴起，专家对它也缺乏了解，经验不足，综合集成同样无济于事；

(3)综合集成要求达到专家群体对计算机模拟结果没有异议，把所有专家的经验都综合于最后的整体定量认识中，这就需要证明这种解是存在的。这叫做综合集成的“解的存在性问题”，是开放的复杂巨系统研究的基本理论问题之一。

10.8 研讨厅体系

对开放的复杂巨系统搞综合集成，是一项规模巨大、过程复杂的工作，需有特殊的组织形式。这就是钱学森倡导的从定性到定量综合集成研讨厅体系 (Hall for workshop of meta-synthetic engineering)。这是把下列成功经验汇总的结果：

- (1) 几十年来世界学术讨论的 Seminar；
 - (2) 从定性到定量综合集成方法；
 - (3) C³I 及作战模拟 (C³: Command, Control, Communication; I: Information)；
 - (4) 情报信息技术；
 - (5) 人工智能；
 - (6) 灵境技术 (Virtual Reality)；
 - (7) 人-机结合的智能系统；
 - (8) 系统学；
 - (9) 第五次产业革命中的其他技术。
-

上述各方面的成功经验提供了建设研究厅体系的建筑材料。图 10.2 和 10.3 是研究厅及研讨厅体系的简单示意图^①。

^① 王寿云等：《开放的复杂巨系统》，259 页。

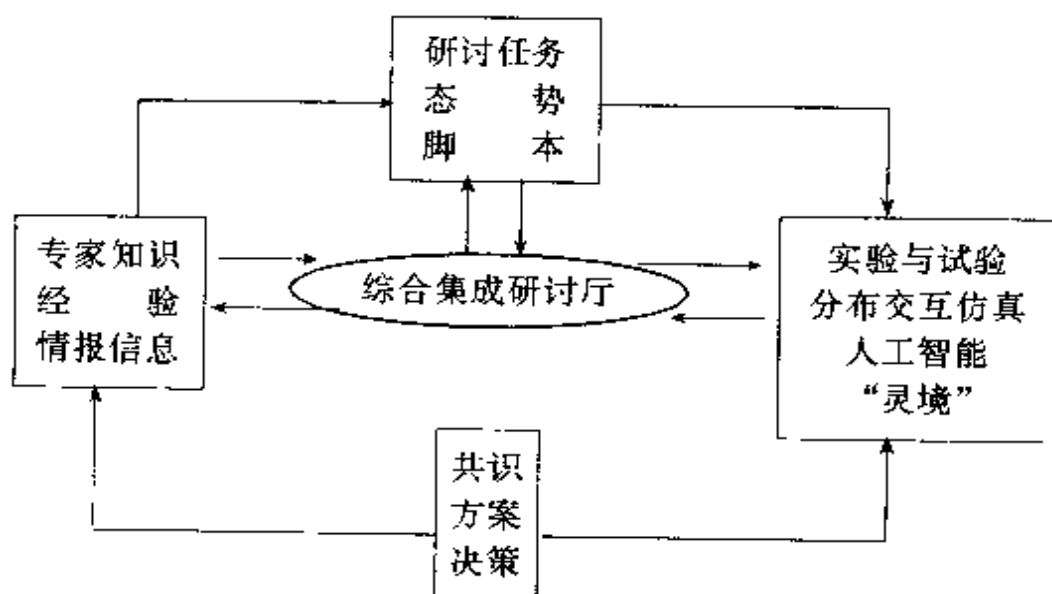


图 10.2

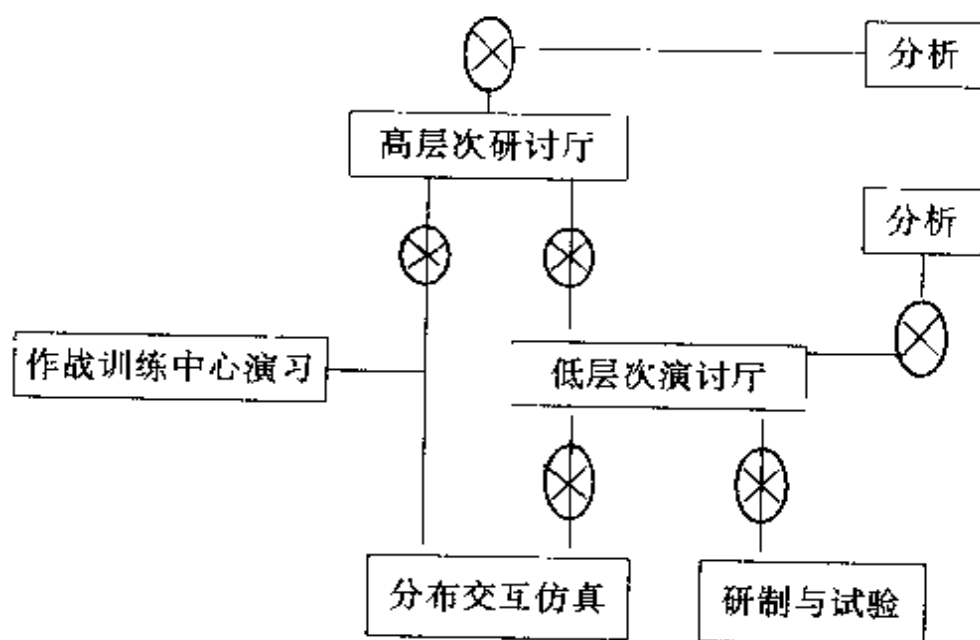


图 10.3

从方法论看，它有如下特点：

(1) 系统性：研讨厅本身是一个系统，由三种性质不同的子系统组成，即知识体系（各种科学理论、专家的经验 and 感受、常识性知识、各种情报资料）、专家体系（包括科学、技术、政治、

经济、文化、军事、外交等各方面、各层次的有关专家)、工具体系(以计算机为核心的多种高技术),它们按系统原理组织起来并运行工作;

(2) Seminar 工作方式:研讨厅为参加者提供了一种结构化、规范化的论坛,吸收各方面专家参加,采取圆桌会议方式,自由发表意见,彼此诘难争论,通过思想交锋,相互启发、激励,最大限度地产生新观点、新设想,这种 seminar 式的合作研究是民主集中制的现代形式,能够把专家们的经验和直感式的判断充分调动出来并集中起来;

(3) 人-机结合的工作方式:研讨厅不是传统人文社会科学式的学术讨论,而是配备有最先进的技术设备,调集大量情报资料,尽量利用人工智能威力的研讨活动;又与传统的人工智能处理问题的方式不同,不寄希望于发明自主智能机,而是强调把人结合进去,实行人-机结合、以人(专家)为主导的技术路线;

(4) 动态性:组成研讨厅的专家和机器都在不断学习,不断更新自己,不断更新资料信息,使得整个系统在不断进化;

(5) 等级层次结构:开放的复杂巨系统问题一般不是单一研讨厅就能胜任的,而应由不同层次的研讨厅构成的体系来完成,图 10.3 是按作战训练模拟系统给出的包含两个层次的研讨厅体系;

(6) 开放性:构成研讨厅的三个子系统都是开放的,特别是专家子系统通过发达的通信设备不断与外界交换信息,参加研讨厅活动的专家大都不是固定的,因任务的不同和进度的不同而经常变更成员。

10.9 建立系统学的新思路

80 年代,钱学森的基本思路是把信息学、控制学、运筹学、系

系统工程与一般系统论、耗散结构论、协同学、超循环论、微分动力系统、混沌学等融会贯通，综合起来，形成一门关于一般系统的基础科学，即系统学。系统学讨论班就是为此而组织的一个 seminar 式的学术论坛。由于景元、朱照宣、郑应平、姜璐等学者组成的小班，是具体承担这一任务的战斗队。由于种种原因，《系统学》这本书未能面世，但他们的努力是有成绩的。

在得到 10.2 节所述系统分类后，钱学森意识到系统学的对象是巨系统，也有分支学科，原来设想的只是简单巨系统学，还应有复杂巨系统学，它不可能在现有系统理论基础上经过综合建立起来，因为这些系统理论研究的基本是简单巨系统，难以反映复杂巨系统的矛盾特殊性。简单巨系统学的条件已基本具备，关键是复杂巨系统学。由此而引出关于开放的复杂巨系统的研究，历时已近 10 年。

在概括出“综合集成”这个重要概念后，钱学森对于建立系统学有了全新的想法。他写道：“把从定性到定量综合集成法作为系统学的主干，说明其他系统方法作的是适合其他特殊条件的特例，是分枝。即不是由提高简单系统、大系统、简单巨系统，建立开放的复杂巨系统理论，而是从复杂巨系统按级作的特例来分化出其他系统理论。把其他理论工作者团结在我们的周围。这是先讲大的总观点，然后讲特例；先建立总的理论，然后讲各种条件下简化的特例。也是从开放的复杂巨系统学建立系统学。从繁到简。”^① 但如何实践这个纲领性的观点，尚无进一步的阐述。

如何建立开放的复杂巨系统学是项难度很大的科学任务。目前只能像钱学森一再讲的那样，从一个个具体的开放复杂巨系统（大脑、人体、社会等）着手。这样得到的结果还属于这些具体领

^① 王寿云等：《开放的复杂巨系统》，299 页。

域的系统理论，不能简单地算作系统学，但是可从中提炼系统学的概念、原理、方法。例如，钱学森从人体系统研究中发现，可以把状态概念引入系统学，提出功能态概念。还应当注意圣塔菲学派等的成果，如他们关于突现性的思考可能对系统学有重要意义。突现性是还原性（释放性）的对立面，找到描述系统的整体突现性的一般方法，才算找到最终超越还原论的道路。圣塔菲学派宣称以复杂适应系统为研究对象，以建立复杂适应系统的一元化理论为目标，这同钱学森学派以开放的复杂巨系统为对象、以建立开放的复杂巨系统学为目标相当接近。圣塔菲的主要人物都是在基础科学层次卓有成就的学者，注重对复杂系统运行演化机制和基本规律的研究，不大关心复杂性研究的当前应用问题。他们的长处正是中国从事系统学研究的主力的短缺之处。所以，我们认为，建立开放的复杂巨系统学应当“偏师借重圣塔菲”。

思 考 题

1. 什么是复杂性？什么是复杂性科学？
2. 如何理解“把复杂性当作复杂性来处理”？这是否意味着否定科学描述的简化原则？
3. 试比较钱学森的开放复杂巨系统理论和圣塔菲学派的复杂适应系统的一元化理论。
4. 试阐述综合集成法的认识论基础。
5. 如何把综合集成法作为主干，“从繁到简”地建立系统学？

阅 读 书 目

1. 钱学森、于景元、戴汝为：《一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论》，载《自然杂志》，1990（1）。

2. 王寿云等：《开放的复杂巨系统》，杭州，浙江科学技术出版社，1996。
3. M. 沃德罗普：《复杂——诞生于秩序与混沌边缘的科学》，北京，三联书店，1997。
4. 尼科里斯、普利高津：《探索复杂性》，成都，四川教育出版社，1986。
5. 苗东升：《把复杂性当作复杂性来研究》，载《科学技术与辩证法》，1996（1）。

第 11 章 信息学

从本章起，我们介绍技术科学层次的系统科学。

11.0 系统技术科学的新划分

80 年代，钱学森学派虽然提出了事理学概念，但技术科学层次的系统科学仍划分为三门，并未把事理学与运筹学区分开。近年来，钱学森的系统科学体系思想有重要的发展。在研读张锡纯的研究报告《工程事理学探索研究》后，钱学森在回信中写道：“近年来我和我的合作者忙于建立系统科学部门的基础科学——系统学，还没有来得及考虑系统科学部门的技术科学。您致力于此，令我非常高兴！您说这一层次的学科（一概称“学”，不称“论”）除运筹学、控制学、信息学之外还应有事理学，对我有启发；是否可以这样认识，即：

（一）控制学，那是讲系统成员关系的人为调控以达到系统整体运行的优化；

（二）运筹学，那是在一定外部规范及信息条件下，使系统取得最佳运行的学问；

（三）信息学，那是专门研究系统成员之间的信息网络建立与优化；

（四）事理学，那是专门研究系统内部各种运行的条件和法律、法规，目的是使系统运行优化。例如您提出的军用标准化问题，现

在的世界形势和民品质量要求因高技术的发展而不断更加严格，和世界标准的一体化、通用化；因此我国老一套从原苏联抄来的军用标准必须改革。”“又：运筹学和事理学都是利用环境以求最佳效益，不同之处在于运筹学是即时效益而事理学是长时期的效益。对一个系统的多次运筹学考虑后也自然会发现事理学性质的启示。”^①

本书赞同上述划分，并按这四门学科组织这部分的内容。钱学森对这几门学科的界定，显然是针对迅猛发展的社会信息化潮流概括出来的，拓展了控制学、运筹学、信息学的学科任务，具有远瞻性，值得深入研究。但把人的关系考虑进来的信息学要复杂得多，目前很少有系统的理论阐述。

1979年，钱学森在谈到控制学时就指出：“一个系统当然有人的干预，在概念上可以把人包括在系统之内，但现在理论的发展还没有达到真能掌握人在一定情况下的全部机能和反应，所以把人包括到系统之中还形不成通用的理论”^②。这种情况今天仍未出现大的改变。有鉴于此，本章仍主要按通常的理解来介绍这些学科。

首先讲信息学。最早对信息问题作系统的理论阐述的，是申农的奠基性著作《通信的数学理论》。由此开始了通信科学的发展历程。国内学者把它翻译为信息论，或称狭义信息论。后来的发展逐步突破通信工程的范围，把通信以外的信息问题也包括进来，力求建立关于信息的基本性质、度量方法以及信息的取得、传送、处理的一般理论，有人称为信息科学。将来的发展是否把信息科学与系统科学作为并列的两大门类，也未可知。

① 钱学森 1996 年 3 月 3 日致张锡纯的信。摘自张教授提供的影印件，未经作者审定。

② 钱学森等：《论系统工程》，增订本，178 页。

11.1 什么是信息

信息是人类生存发展须臾不可或缺的东西。有人类的活动,就有信息的获取、传送和利用。反映在认识中,形成相应的概念和术语。唐诗云:“塞外音书无信息,道旁车马走尘埃。”(许浑)宋诗云:“辰沙更在武陵西,每望长安信息稀。”(王廷圭)古代各民族对信息都有所认识。但在漫长的历史时期中,无论中国还是西方,信息只是个一般术语,不是科学概念。诗人讲的信息即音信、消息。《儒林外史》第42回的回目“家人苗疆报信息”,说的是正在内地游玩的贵州总督得到家人报告的关于苗族人民反抗朝廷统治的消息。直到19世纪,人们尚未认识到需要区分信息和消息这两个术语。

即使现在,人们日常生活中讲的政治信息、经济信息、体育信息、文艺信息、科技信息等,指的都是有关方面的消息。这种通俗理解的信息,还包括新闻、情报、资料、数据、表报、图纸、曲线,以及密码、暗号、手势、旗语、眼色等等。你取得这些东西,你就取得了信息。关于信息的这种通俗理解,虽不精确,但对于处理日常工作和生活问题完全够用,不会引起误解。所以,各国的词典都按这种方式阐述信息概念。例如,美国的韦伯字典讲:信息是“用来通信的事实,在观察中得到的数据、新闻和知识”。英国的牛津字典讲:“信息就是谈论的事情、新闻和知识”。日本的广辞苑说:“信息是所观察事物的知识”。人文社会科学一般都是在这种意义上使用信息概念的。这是信息概念的通俗解释。

19世纪发明的电报和电话,开创了人类利用人工电信道进行通信的历史。通信技术开始与现代科学(物理学、数学、技术科学等)发生密切关系。通信技术实践中经常出现收到消息但没有收到信息的事,或者传送了大量消息但只收到很少信息。这些事

实启示人们应当区分消息和信息，给信息以科学的阐述。发展到今天，人们发现信息作为一个科学概念，含义极其广泛，需要从不同学科层次和角度加以考察。对信息可以作技术（通信）的考察，或自然科学的考察，或社会科学的考察，或系统科学的考察，或哲学的考察。但除了通信科学，其他方面的信息概念至今尚无统一的定义。

按通信科学要求给信息下定义，首先要弄清信息与消息的区别。消息是由语言、文字、数字等符号组成的序列，信息是这些符号序列中包含的内容。消息是信息携带者，但并非任何消息都携带着信息。任何一个文字或符号序列都是一个消息，但同样长的符号序列包含的信息可以不同，许多符号序列完全不包含信息。“我爱中国”是一条包含信息的消息，“国我中爱”只是一个汉字序列，无任何意义，传送这样一条消息不会传送任何信息。有意义的符号序列才包含信息。

一条消息是否包含信息，还与消息接受者的知识状况有关。信息是消息接受者从消息中得到的新知识。得到一条无法理解的消息的接受者并未得到信息。一句有内容的话是一条消息，头一次听可以从中获得知识，第二次听到可能从中品味出第一次没有理会到的意思，若一再重复就不会给人以信息了。俗语所谓“话说三句淡如水”，就是这个意思。所以，我国辞海规定：“信息是对消息接受者来说预先不知道的报道。”这是信息的一个重要特性。

通信是把信息从发送处传输到接收处的过程。人们所以要通信，是由于接收信息者需要了解发送信息者的状态、行为、属性、需求等。假定发信者的状态或行为只有一种可能，收信者知其固定不变，便没有通信的必要。只有当发信者的状态或行为有多种可能情形，才会产生对通信的需求。通信的前提是存在不确定性，通信的目的和功能是消除不确定性。一个参加高考的学生在未收到录取通知单之前，自己的前途存在种种不确定性，录取通知单

能给他带来消除这些不确定性的信息。可见，消息中包含的信息具有能够消除收信者的不确定性、增加其确定性的意义和作用。信息科学由此认定：信息是通信中消除了的不确定性，亦即通信中增加了的确定性。

通信过程中，由于种种原因，收信者在收到消息后不一定能消除全部不确定性，甚至可能没有消除任何不确定性。某人由北京赴杭州前电告那里的朋友：“我于6月5日乘早班机赴杭。”朋友接电报后，关于乘哪种交通工具及动身日期的不确定性消除了，乘晚班机的可能性也排除了，但乘8时或11时的早班机这种不确定性未消除。基于这种情形，信息学奠基者申农把信息定义为“两次不确定性之差”，即

$$\text{信息} = \left(\begin{array}{c} \text{通信前的} \\ \text{不确定性} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{通信后仍有} \\ \text{的不确定性} \end{array} \right) \quad (11.1)$$

从通信工程的角度看，所要消除的不确定性主要是消息发生的偶然性、随机性。对于通信系统的设计者来说，用户要传送什么消息是无法预先确定的偶然事件。通信系统的设计不应当针对某些特定用户和某一次特定通信，而应针对大量用户在长时间内发送消息的平均情况，即把消息的发送看作一种随机事件序列。设计者面对的是一种统计不确定性。通信所要消除的是随机不确定性，申农信息是一种统计信息，或称概率信息。

11.2 信息量

信息也有量的规定性。与人交谈，有时觉得收获很大，“听君一席话，胜读十年书”；有时又觉得老生常谈，信息不多。两种不同感受，表示两次通信所得到的信息不仅在质上有差别，在量上也有差别。消息中包含信息的多少，就是信息量。

与物理量不同，信息量是一种抽象量，不能像长度、速度、能

量那样用物理方法实际测量。申农从通信的角度把信息的意义和效用等因素撇开，仅仅考察统计不确定性，给予信息量以严格定义。既然信息被理解为消除了的不确定性，对信息的度量就归结为对通信中消除了的不确定性的度量。为找到具体的度量方法，首先考察信息的两个基本特征。

例1 70年代的电台播出过两条信息：“苏联军队击落韩国客机”(A)，“越南人民军击落美军战斗机”(B)。两条消息都是击落飞机，但我们明显地感到两者的信息量有很大不同。在和平时期击落外国客机的事极少可能发生，此类事件的不确定性即意外程度极大，一旦发生后对人们的心理震撼很大。正在交战的越南战场上击落战斗机是几乎必然要发生的事，不确定性只在于发生的时间、地点等。消息A发生的可能性极小，但带来的影响即消除的不确定性很大，因而信息量很大。消息B发生的可能性很大，能消除的不确定性不多，即信息量不大。

在数学上，对随机事件发生可能性的大小以概率来度量。以 I 记消息包含的信息量， p 记消息发生的概率， $0 \leq p \leq 1$ ，则有以下关系：

p	大	小
I	小	大

或

$\frac{1}{p}$	大	小
I	大	小

由此表看出信息量的一个基本特征：消息包含的信息量是由消息发生概率决定的，概率小则信息量大，概率大则信息量小。用函数形式表示为

$$I = f(p) \quad \text{或} \quad I = g\left(\frac{1}{p}\right) \quad (11.2)$$

例2 某人到剧院找朋友，剧院有20行30列座位，朋友的位置有600种可能。消息A说“他在第6行”，消息B说“他在第9列”，合成消息 $C=AB$ 说“他在第6行第9列”。由概率论知， $p(AB)=p(A)p(B)$ 。但经验告诉人们，消息C的信息量应是消息

A 的信息量与消息 B 的信息量之和。

这个例子显示信息量的另一特征,即具有可加性。一般地,若 A 和 B 为两个相互独立的消息, C 代表 A 与 B 同时发生的合成消息, 即 $C=AB$, 则

$$I(AB)=I(A)+I(B) \quad (11.3)$$

(11.3) 式表示, 求信息量的运算应当满足可加性要求, 即计算两个独立消息乘积的信息量时, 可先分别计算两个消息的信息量, 然后把它们加起来。由于信息量由概率决定, (11.3) 式意味着求信息量的运算把乘法变为加法。由初等数学知, 对数运算满足这个要求。信息量是相对量, 原则上可以有不同的数学表示形式。但鉴于这种可加性, 如哈特莱所说, 最自然的形式是对数函数。结合 (11.2) 和 (11.3) 式, 得到以下精确定义:

定义 1 以概率 p ($\neq 0$) 发生的可能消息 A 所包含的信息量 $I(A)$ 是概率 p 的倒数的对数

$$I(A)=\log_2 \frac{1}{p} \quad (11.4)$$

或者写作

$$I(A)=-\log_2 p \quad (11.5)$$

(11.5) 式表示, 消息包含的信息量是该消息发生概率的对数的负数。这就是维纳关于信息量的著名定义。

显然, 必然事件 ($p=1$) 的信息量为 0。不可能事件 ($p=0$) 不符合上述定义的条件, 但根据其实际意义 (不可能发生的消息不包含信息), 取如下规定:

$$I=0, \text{ 若 } p=0 \quad (11.6)$$

由定义直接推知, 信息量具有非负性

$$I \geqslant 0 \quad (11.7)$$

这里取对数的底为 2, 是适应计算机的二进制而确定的。原则上可以取任何正实数 a 为底定义信息量

$$I = k \log_a \frac{1}{p} = -k \log_a p \quad (11.8)$$

系数 k 因 a 而异, 按不同底数计算的信息量有不同的单位, 可以相互换算, 通常还采用 10 和自然对数底 e 来计算信息量。当 $a=2$ 时, 信息量的单位为比特。

例 3 投掷硬币, 消息 A 代表麦穗朝下, 发生概率为 $p(A)=0.5$, 按 (11.4) 计算得

$$I(A) = \log_2 2 = 1 \text{ 比特}$$

一切二中选择一等可能事件包含的信息量均为 1 比特。

例 4 工会有一批脸盆发给会员, 其中优质品为 40%, 合格品为 55%, 次品为 5%。发放规则为随意抓号, 按号取货, 不许挑拣。问“王东拿到次品”这一消息的信息量是多少?

解 据题设, 该消息是随机事件“随便拿一个而得到次品”, 概率为 $p=0.05$ 。按公式计算得

$$I = \log_2 \frac{1}{0.05} = 4.32 \text{ 比特}$$

在例 2 中, 设消息 A 为“朋友所在的行是双号”, B 为“朋友所在的列为单号”, C 为“朋友在 6 排 9 列”。请计算 $I(A)$ 、 $I(B)$ 、 $I(C)$ 。

可能消息在传送端的发生概率称为先验概率, 在接受端出现的概率称为后验概率。在实际通信中, 某个消息传送到接收端后可能仍然是随机事件, 没有完全消除不确定性。按 (11.1) 式, 实际传送的信息量为

$$\begin{aligned} I &= \log \frac{1}{\text{先验概率}} - \log \frac{1}{\text{后验概率}} \\ &= \log \frac{\text{后验概率}}{\text{先验概率}} \end{aligned} \quad (11.9)$$

后验概率为 1 时, 按 (11.9) 计算的信息量与按 (11.4) 计算的结果相同, 表示传送过程无信息损失, 先验不确定性全部消除。后验概率与先验概率相等时, 表示信息在传送过程中全部损失掉, 没有消除任何不确定性。一般情形处于二者之间, 经过通信消除了

部分不确定性，又未全部消除。

同一通信过程中包含大量不同消息，可以构成各种复合消息，须有不同的信息量计算公式。消息 A 与 B 同时发生所构成的联合消息 AB ，包含的信息量为

$$\begin{aligned} I(AB) &= -\log p(AB) \\ &\leq I(A) + I(B) \end{aligned} \quad (11.10)$$

当且仅当 A 与 B 为相互独立的消息时，上式中的等号才成立，它就是 (11.3)。(11.10) 表明，联合消息的信息量不大于各个消息的信息量之和。

在同一通信过程中，一个消息的发生可能对另一消息的发生有影响，须用条件信息概念刻画。

定义 2 在给定消息 B 的条件下消息 A 发生所携带的信息量称为条件信息，记作 $I(A|B)$ ，规定为

$$I(A|B) = -\log p(A|B) \quad (11.11)$$

$p(A|B)$ 为条件概率。

相对于定义 2 的条件信息，定义 1 给出的应是无条件信息。

根据条件概率的计算公式，显然有

$$I(A|B) = I(AB) - I(B) \quad (11.12)$$

11.3 信息熵

实际通信过程中，发送端具有发生多种可能消息的能力，仅仅计算单个消息的信息量是不够的。人们在通信中主要关心的不是个别消息，如单个字母、文字、音素或像素，而是整个消息序列。需要对整个消息序列的信息量进行度量。刻画一组数值的整体特性的常用办法是求平均值。由于消息序列是随机发送的，算术平均值不能反映整体信息能力，有效的办法是求序列中各个消息所包含的信息量的统计平均值。

通信过程中发送端发送的消息序列,按其数学特性分为两类。一类是离散消息序列,如电报、书信等通信方式,所发送的消息或信号在时间上可以相互分立。另一类是连续消息序列,如电视图像、人的语音等,特点是所发送的消息或信号在时间上无法分立,而是连续发送的。离散序列易于处理。下面仅就离散情形作些讨论。

设发送端的可能消息集合为

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11.13)$$

各可能消息分别按概率 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 发生,并满足归一性条件

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1 \quad (11.14)$$

按一定的概率从集合 (11.13) 中随机地选择消息发送,形成一个消息序列。设序列中包含的消息总数为 N , N 非常大。在统计意义上,该序列中包含的消息 x_i 的数目为 $p_i N$ 个,所有 x_i 包含的信息量为 $-(p_i N) \log p_i$ 。将序列中所有消息包含的信息量之和除以 N ,得到序列中每个可能信息的平均信息量为

$$\begin{aligned} H &= -(p_1 \log p_1 + p_2 \log p_2 + \dots + p_n \log p_n) \\ &= -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i \end{aligned} \quad (11.15)$$

H 是可能消息集合 (11.13) 的整体平均信息量,亦即单位消息的信息量。由于 (11.15) 与统计物理学的熵公式一致,信息学把 (11.15) 式称为信息熵。

定义 3 可能消息集合 (11.13) 的整体平均信息量 (11.15) 称为信息熵,简称为熵。

消息发生概率对可能消息集合的信息量有两种相反的影响。就单个可能消息看,概率越大信息量越小。但概率大意味着该消息在整个消息序列中所占比例也大,因而对整体平均信息量的贡献也大。熵公式 (11.15) 表现了概率的这两种相反的影响,因而完整地刻划了可能消息集合的信息特性。熵值大表示发送信息的

能力大，即消除不确定性的能力大。

例 1 前节例 2 的信息熵为

$$\begin{aligned} H &= -(0.4\log 0.4 + 0.55\log 0.55 + 0.05\log 0.05) \\ &= 1.22 \text{ 比特每符号} \end{aligned}$$

例 2 取英文字母表为可能消息集合，共 26 个可能消息。根据英文书刊中各字母出现频率的统计研究，可确定每个字母的出现概率。按熵公式算得英文字母表的信息熵为 $H=4.15$ 比特。

二中择一等可能消息集合的熵为 1 比特。

信息熵有以下特性：

(1) 非负性

$$H \geq 0 \quad (11.16)$$

由于 $p \geq 0$ 和 $I \geq 0$ ，从定义可直接得到 (11.16)。等号只有当消息集合中某个消息 x_k 为必然事件 ($p_k=1$)、其余均为不可能事件 ($p_i=0, i \neq k$) 时才成立。

(2) 对称性 消息集合 (11.13) 的熵 H 只与概率分布 ($p_1, p_2, \dots, p_n$) 有关，与 p_i 的次序无关。即仅仅改变 p_i 的排列次序， H 值保持不变。

例 3 设可能消息集合为 $X=(x_1, x_2, x_3)$ ，三种概率分布为 $P_1(1/2, 1/3, 1/6), P_2(1/3, 1/6, 1/2), P_3(2/3, 1/4, 1/12)$ 。 P_1 与 P_2 只有次序不同，为同一种概率分布，故有 $H_1=H_2=1.46$ 比特。 P_3 为另一种概率分布，相应的熵 $H_3=1.19$ 比特。

(3) 极值性 对于一定的 n (可能消息数)，熵函数 (11.15) 在等概分布下取最大值，即

$$H_n(p_1, p_2, \dots, p_n) \leq H_{\max} \quad (11.17)$$

以 $H_{\max}$ 或 H_m 记最大熵，有

$$\begin{aligned} H_{\max} &= H(1/n, 1/n, \dots, 1/n) \\ &= \log n \end{aligned} \quad (11.18)$$

(11.18) 称为离散消息集合的最大熵定理。

对于给定的 n ，可能消息集合的熵是由它的概率分布决定的。概率分布越均匀，熵 H 越大。等概率分布是最均匀的分布。最大熵定理断言，均匀分布的消息集合具有最大的先验不确定性，能发送最大的信息量。相反，概率分布越不均匀，可能消息集合的熵越小。在极端情形下，可能消息集合中只有一个必然发生的消息，其余均为不可能消息，则它的熵 $H=0$ 。

(4) 任给两个消息集合 X 、 Y ，则有

$$H(XY) \leq H(X) + H(Y) \quad (11.19)$$

$H(XY)$ 为联合熵。(11.19) 是 (11.3) 的推广，表明两个消息集合的联合熵同时发生的熵) 不大于这两个消息集合之熵的和。式中等号当且仅当 X 与 Y 为相互独立的消息集合时成立。

11.4 通信系统

人类以多种方式进行通信。打电话，拍电报，书信往来，图像传真，是通信。听广播，看电视，读书阅报，文艺演出，是通信；两人面谈，多人讨论，教师授课，领导讲话，以至打手势、使眼色、送秋波，也是通信。从系统观点看，这些五花八门的通信活动都是作为一定的系统进行的。凡通信必定涉及两种实体，发送信息的实体叫做信源，接收信息的实体叫做信宿。通信过程是信源与信宿之间的一种特定的关联方式，一种系统现象或系统行为。信息是一种系统特性，信息量是一种系统量。实施通信活动的系统，叫做通信系统。

信源与信宿进行通信的必要性，在于信源发送什么消息有不确定性，信宿需要获得来自信源的消息以消除这种不确定性。通信的可能性，在于信源与信宿之间有可通信性，即信源与信宿之间具有相同的信号信码库，至少是彼此的信号信码可以互换（翻译），信宿能够从消息中提取信息。“对牛弹琴”之所以应当嘲笑，

主要是弹琴者不了解牛无法接受琴声中包含的情感信息和美学信息，虽闻琴声却不知其雅意，因为弹琴者与牛之间没有这方面的可通信性。

在最初级的情形下，信源与信宿作为不同的物质实体通过直接的碰撞而交换信息，无须中间环节。一切利用信号或符号进行的较高级的通信活动，都不能由信源与信宿直接耦合而构成通信系统，必须有中间环节。不同的通信系统在构成上千差万别，但撇开组分的具体特性可以发现，一切通信系统都有如下共同结构

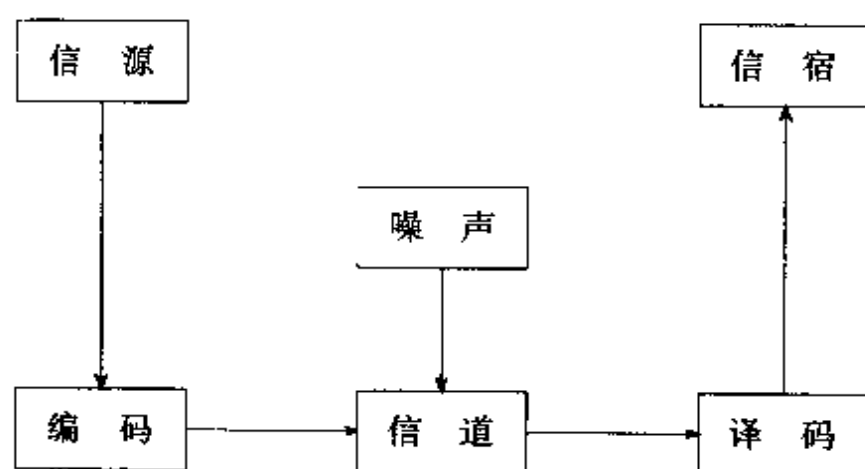


图 11.1

(1) 信源与信宿 信源即信息的来源或源泉，可以是人、生物、机器、社会组织或其他物体。信宿即通信过程结束后信息的归宿，也可以是人、生物、机器、社会组织或其他物体。信源与信宿的不同组合，构成不同的通信系统：人-人通信，人-生物通信，人-机通信，机-机通信，等等。原则上讲，人与一切无生命客体都可以通信，如考古学家发掘古生物化石，天文学家观察天体，都是通信过程。只有一个信宿的是单用户通信，如打电话。同时有不同用户的是多用户通信，如广播、电视等。按信息传送方向划分，有单向通信（如广播）或双向通信（如电话）。

发出离散信号的信源，称为离散信源。发出连续信号的信源，

称为连续信源。信息学关心的是信源的信息结构和数量特征。我们主要讨论离散信源。信息结构由两个要素组成。一个是信源的可能消息集合

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad (11.20)$$

其中，每个可能消息都是一个随机事件。另一个要素是可能消息的概率分布

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (11.21)$$

p_i 为可能消息 a_i 的发生概率，满足归一性条件 (11.14)。给定信息结构，就可以计算信源的各种数量特征。

信源的数量特征首先是它的熵。离散信源的熵按 (11.15) 计算，最大熵按 (11.18) 计算。熵 H 与最大熵 H_m 的比值 H/H_m ，称为相对熵。显然有

$$0 \leq \frac{H}{H_m} \leq 1 \quad (11.22)$$

相对熵可以看作可能消息集合概率分布均匀性的某种度量，是信源的重要数量特征之一。概率分布愈均匀， H 愈接近 H_m ，相对熵愈大。完全均匀的等概率分布对应于最大的相对熵， $\frac{H}{H_m} = 1$ 。概率分布愈不均匀，相对熵愈小。概率分布最不均匀的信源，其相对熵为 0。

相对熵与 1 的差值，称为可能消息集合的剩余度，记作 γ ，即

$$\gamma = 1 - \frac{H}{H_m} = \frac{(H_m - H)}{H_m} \quad (11.23)$$

显然有

$$0 \leq \gamma \leq 1 \quad (11.24)$$

英文字母表作为可能消息集合，它的最大熵为 4.7 比特，剩余度 $\gamma = 0.12$ 。

在通信系统中，除了传送或恢复消息时所需要的信号之外，其余出现在信源、信道、信宿或系统其他部位的任何细节都叫做剩

余，它们对完成通信任务是多余的，把它们除掉对实现通信目标没有实质性影响。剩余度是对剩余现象的定量刻划。概率分布愈均匀，剩余度愈小，通信效率愈大。等概率分布的剩余度为 0，表示没有剩余，通信系统具有最大的有效性。如果消息集合中有一个消息是必然事件，其他皆为不可能事件，则剩余度为 1，表示所传送的信号或符号都是多余的。

剩余度是信息学的重要概念，刻划信源特征的指标之一。剩余度大的可能消息集合发送的消息序列中无益成分大，通信效率差。说话重复，繁文褥节，客套话，外交辞令，官僚主义的文件等，剩余度很大。直率的言词，精炼的文字，剩余度小。人们厌烦说话啰唆，主张说话与行文言简意赅，删除一切不必要的词句，就是为了减少剩余度，提高通信效率。但有剩余度对于通信并非纯粹消极因素。文章有一定剩余度，读者可以根据上下文看懂一些不易理解的论述，能够从古书典籍有脱漏的文字中认出原文。在通信技术中，常常利用剩余度来提高通信的可靠性。

设信源在单位时间内共发送 m 个消息，可能消息的平均信息量为 H ，则单位时间（1 秒）内信源发送的信息量为

$$H' = mH \text{ 比特点每秒} \quad (11.25)$$

H' 称为信源的信息率，即发送消息的速率。

熵 H ，最大熵 H_m ，相对熵 $\frac{H}{H_m}$ ，剩余度 γ ，信息率 H' ，都是统计量，刻划的都是信源的统计特性。

(2) 信道 传送信息的通道，即载荷着信息的信号藉以通行的物理设施或介质场，称为信道。信道是联接信源与信宿的主要中介环节。不同物理性质的信号，需要不同物理性质的信道来传送。传送声音信号的通道是地球周围的大气层，称为声信道。传送光信号的通道是天然的光场或人造光纤，称为光信道。传送电信号的通道有两类，电缆为有线电信道，电磁场为无线电信道。书

信这种信息载体的传送通道主要是邮电系统。还有其他种类的信道。不论哪种信道，输入信号和输出信号都是随机变量。按数学特性，可以把信道划分为离散信道和连续信道，有噪声（有错）信道和无噪声（无错）信道，等等。

信道的性能指标之一是通信速度，记作 R ，定义为

$$R = \frac{\text{（每个消息的）平均信息量}}{\text{（每个消息的）平均传送时间}}$$

以 τ 记每个消息的平均传送时间，有

$$R = \frac{H}{\tau} \quad (11.26)$$

通信速度 R 的大小因信道输出信号的概率分布 P 的不同而不同。令 C 记其上限，即

$$C = \max_{p_i} R \quad (11.27)$$

C 称为信道容量，是衡量信道性能优劣的主要指标。通俗地讲，信道容量是信道最大可能的通信速度，表示信道传送信息能力的极限。 R 与 C 均为统计量。可以按照 R 与 C 去比较不同信道的优劣，通过分析通信速度和信道容量，可以对给定的信道作出性能评价，判断有无改进的必要。

(3) 编码与译码 信源与信道，信道与信宿，都不能直接耦合，必须有中介环节。把信源与信道耦合起来的中介环节叫做编码器，把信道与信宿耦合起来的中介环节叫做译码器。首先，信源发出的消息或信号不能直接在信道中传送，需要经过编码器的适当变换。如在电话通信中，编码器即话筒，讲话人发出的语音信号不能直接在电话线中传送，需要经过话筒变换为可以在电线中传送的电压信号。译码器是听筒，电话线中传来的是电压信号，需要经过听筒变换为语音信号，才能为听话人接受。编码和译码是一切通信过程必须的操作手续。

上述有关传送信号在物理形式方面的变换，并非信息学研究

的问题。通信的基本要求是多快好省地传送信息。但多、快、好、省之间互相制约,处理好这些矛盾,对通信工程十分重要。信息学的编码理论是从提高通信的有效性、可靠性、经济性的目标出发,从信源和信道在数量特性方面如何匹配着手,研究信号变换的。信源有信息率高低之分,信道有容量大小之别。信源熵 H 越大,传送信息所需信道容量 C 越大。 H 大而 C 小,信息不能及时传送出去,通信效率不好。 H 小而 C 大,信道能力不能充分利用,经济性不好。两种情形都应当避免。这就要求信源与信道在数量特性上互相匹配。编码的主要功能就在于解决这个问题。 H 与 C 都是统计量,信源与信道的匹配是统计特性的匹配。信源一般都有剩余,剩余大则通信速度小。编码的目的之一是减少信源的剩余度,力求获得接近最大熵的信息含量。对有剩余的消息进行无剩余或少剩余的编码,以利于提高传送速度,叫做信源编码,或称有效编码。

编码理论是申农信息学的重要内容,核心是三个编码定理,回答通信系统在什么情形下可以编码,在什么情形下不存在任何编码的可能。最简单的一个是所谓“无限小失真的信源编码定理”。

定理 假定信道无噪声,信源熵为 H ,信道容量为 C ,那么

(1) 总可以对信源的输出进行适当编码,使得信道中能以 $(\frac{C}{H}) - \epsilon$ 的平均速度传送信息,其中 ϵ 是任意小正数;

(2) 不存在使平均传送速度大于 $\frac{C}{H}$ 的编码。

编码定理揭示了信息在通信过程中的运动规律,表明熵 H 、通信速度 C 等性能指标对描述通信系统是何等重要。

编码的实质是通过变换信源可能消息的概率分布,尽可能与信道特性实现理想的匹配。上述定理证明这样做是有限度的,并给出在什么范围内可以找到编码方法,越过这个范围则不存在使信源与信道匹配的编码。但这些定理都是关于编码存在性的命题,并未给出如何编码的方法。

编码是对信源发送的消息进行变换,译码是对信道传送给信宿的消息进行变换,即编码变换的逆变换。从通信工程讲,编码和译码是两种互逆的操作。以 P 记编码, P^{-1} 记译码, u 记待编码的消息, u' 记编码后的消息,则编码变换可表示为

$$u' = Pu \quad (11.28)$$

译码变换可表示为

$$u = P^{-1}u' \quad (11.29)$$

基于这个假定,信息学不研究译码过程。编码理论关注的是信源与信道之间的统计匹配问题,信道与信宿之间不存在统计匹配问题,只要正确转换信号形式即可。

现在的信息学也不对信宿作专门的研究。通信工程的前提是假定信宿与信源有相同的信号信码库,只要把消息准确地传送到信宿,信宿便可获得全部信息。实际情形并非如此简单,信源与信宿的信号信码往往不是一一对应的,如不同语言之间的通信、翻译,不能像(11.29)那样严格可逆。这里有许多理论问题有待研究。

11.5 噪 声

通信系统中除开预定要传送的信号之外的一切其他信号,统称为噪声。电话中的嘶嘶音响,电视中的图像脉动、雪花干扰,书报中的错误,都是噪声。噪声对通信产生许多不利影响,或掩埋信息,或以假乱真,或使信息畸变,导致通信错误,损失信息量,严重时可能使通信完全失效。噪声是通信的大敌。糟糕的还在于,在同一系统中噪声信号与载带信息的信号具有相同的物理形式。如在语声系统中,噪声也表现为声波。在电磁系统中,噪声也采取电磁波形式。真实的通信系统中必然存在噪声,不可能完全避开它。人类只能在噪声中通信,在与噪声作斗争中通信。基于这一点,信息学把噪声源作为通信系统模型中的一个必要环节(图

11.1), 把对噪声特性的描述、寻找同噪声作斗争的有效手段, 作为信息学的重要内容。

存在不同类型的噪声。就来源看, 从系统外部混入系统的无用信号, 称为外噪声; 由系统内部元件性能参数的无规变化等因素产生的有害信号, 称为内噪声。外噪声可以设法避开或削弱, 如选择噪声小的环境, 采用隔音、挡光、减震装置等屏蔽技术。内噪声原则上不可能消除。物理学证明, 物质系统只能处于绝对零度以上, 只要没有到绝对零度, 内噪声就不可避免。从功率谱特性看, 在整个频段内功率谱保持不变的是白噪声, 功率谱随频率变化而变化的是有色噪声。从通信工程看, 一切噪声都是随机信号, 具有统计特性, 需要用概率统计方法处理。信息学对此已有大量成果, 可参看有关书籍。

从系统科学(特别是通信理论)的观点看, 同噪声作斗争有两个基本方面。一是提高通信可靠性, 减少信道传送信号中的噪声。实际的信道都有噪声干扰, 前节所述定理的条件不成立。为提高传送信息的可靠性, 即提高通信系统的抗干扰能力, 申农证明了有噪声信道的编码定理(即申农第二编码定理)。基本方法是利用剩余的有用性质, 在编码中人为地加入适当形式的剩余。这叫做可靠性编码, 或称信道编码。提高信噪比(信息信号的功率与噪声信号的功率之比)也是提高通信可靠性的手段。人们在吵闹的环境中交谈时提高嗓门说话, 就是通过提高信噪比来抗干扰。同噪声作斗争的另一个方面是从信道输出的、混杂有噪声的信号中滤掉噪声, 把掩埋在噪声中的有用信号检测出来。这就是信息学中关于信号检测、滤波的理论和技術。

必须指出, 信息与噪声的区别是相对的, 视具体的通信目的和系统而定。同一种信号在这种情形下传送的是有用的信息, 在另一种情形下就可能是噪声。悠扬的歌声对于欣赏音乐的人带来美感信息, 对于正在潜心写作的学者是令人讨厌的噪声干扰。电

视图像脉动对于电视机修理工能提供必要的信息。一切噪声信号都来自某种真实过程,可以通过它来了解该过程的状态、特性、规模、方向等,对于研究该过程的人都是信息。可见,信息与噪声作为两个矛盾方面,同样可以在一定条件下相互转化。

在信息学的早期,噪声被视为有百害而无一利的因素。随着信息学的发展,人们逐渐发现噪声有时也有可以利用的方面。噪声能掩埋信息这一特性就大有用处。大雾迷天,掩盖了交通信息,不利于安全行驶。但诸葛亮利用迷江大雾掩盖东吴水军行动的信息,导演了草船借箭的历史名剧。无论战争时期的军事通信,还是和平时期的商战通信,都强调信息保密。通信系统设计者有意在发送端加入有选择的干扰信号,使对手无法分辨真伪,但己方的接受端按约定的规则除去加密信号,就能安全地获得信息。噪声可以掩藏和畸变信息的特性,还被用来干扰、破坏敌方的通信。

由于白噪声在一定的平均功率下具有最大的熵,对于通信、雷达、计算机等电子技术有很大危害。但从40年代申农的工作开始,人们逐步发现当存在高斯噪声干扰时,在有限平均功率信道上的最有效通信,应当具有白噪声的统计性质。根据这一特性,人们提出利用噪声进行通信的设想,并创造出相应的技术。如在雷达技术中,采用白噪声形式的信号,可以实现同时测距或测速,测量的模糊度最小。在技术上,已发明了一些容易产生、加工和复制具有白噪声性质的伪随机信号,以实现所谓“噪声通信”。伪噪声编码信号的理论和技术已成为通信科学的重要研究领域。这表明,自然界不存在纯粹有害的东西,一切物质属性都可以被利用来为人类服务。

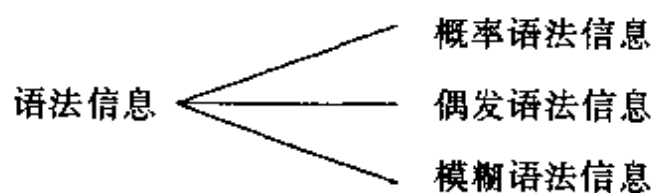
11.6 广义信息 全信息

申农信息学的成功,促使人们把信息概念向更多的领域推广,

提出各种广义信息概念，加深了对申农信息（狭义信息）定义的优点和局限性的理解。

申农在创立信息学时就指出，从工程技术角度看，通信的基本问题是在通信的一端（信宿）精确或足够近似地复制另一端（信源）所挑选的消息或符号序列，信息的其他方面与工程问题无关，应当略去不计。换言之，通信工程关心的只是信息的形式特性，亦即语法特性，只要准确地将载带信息的符号序列传送到接收端，通信任务就算完成了。因此，申农信息是一种语法信息。

信息的实质是消除不确定性。现实世界存在各种各样的不确定性，单就形式方面消除这些不确定性，须定义不同的语法信息。用概率定义信息，表明狭义信息学度量的是随机不确定性，属于概率信息或统计信息。还有非概率信息，如偶发信息、模糊信息等。即



真实的通信问题包含互相联系的三个层面：(1)技术问题，即如何精确地传送通信符号的问题，亦即语法问题；(2)语义问题，即如何使传送的符号准确表达消息的含义问题；(3)效用或价值问题，即信宿收到的信息含义如何影响他的行为的问题。申农考虑的问题属于第一层面，把信息的语义特性和语用特性当作与通信无关的东西略去不计，仅就通信技术看这是必要的和许可的。但信息是包含内容即意义的消息（符号）系列。具有相同语法特性的消息系列，其含义常有真伪、精粗、富贫之分，有待信宿的鉴别和提取，并非只要准确地复制了消息就完事大吉。信息具有语义特性，须用语义信息来刻画。这是信息的第二层面。设有三条消息

A：“独孤雄是科学家”

B: “独孤雄是人工智能专家”

C: “独孤雄正在研制向围棋世界冠军挑战的电脑
‘浅绿’”

消息 A 最粗糙, 消息 B 比较具体, 消息 C 最精细, 三者语义上有显著区别。通信的目的不是得到消息序列, 而是获得消息序列中包含的语义。信息活动不限于通信, 如推理、识别、预测、决策等思维过程是更复杂的信息活动, 基本前提是利用信息的内容(语义)。具有相同语法特性的消息序列的含义常有真伪、精粗、贫富之分, 有待信息的使用者进行鉴别、提炼、加工。不能从收到的消息中去粗取精、去伪存真, 不了解信息的内容, 不准确把握消息的语义, 就不可能作出正确的推理、识别、预测、决策。因此, 研究语义信息的意义是极其重大的。

定性地描述语义信息并非难事, 但定量地描述却相当困难, 至今没有真正解决。一种设想是仿效申农的思路, 以逻辑概率代替统计概率, 以状态描述代替可能事件, 对消息的逻辑真实性和精确性进行度量。我们称一个真实的消息为一个状态描述 z , 令 m_i 记第 i 个状态描述 z_i 的逻辑概率, 满足

$$0 \leq m_i \leq 1 \quad (11.30)$$

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1 \quad (11.31)$$

定义状态描述 z_i 的语义信息为

$$I(z_i) = -\log m_i \quad (11.32)$$

其单位也是比特。若两个消息是逻辑独立的, 即逻辑概率满足

$$m(z_i, z_j) = m(z_i)m(z_j) \quad (11.33)$$

则上面定义的语义信息也具有可加性

$$I(z_i, z_j) = I(z_i) + I(z_j) \quad (11.34)$$

信息具有语用特性或价值属性。信宿在接收信息后所发生的变化和引起的效果, 即信息的价值。不同信息对同一信宿, 同一

信息对不同信宿，常有不同的价值。有关香港回归祖国的信息对于中国与英国在价值或效用上显然很不一样。同一条有关股票的信息对于学问家和股民的效用也大不相同。被申农通信理论忽略了的值因素，对于通信以外的信息活动也是至关重要的。正确的推理、识别、预测、决策等思维活动同样以了解信息的值因素为前提。

刻划信息的语用特性的基本概念是语用信息。

早在 60 年代，人们就试图定量地刻划语用信息。这里介绍贝里斯和高艾斯的有效信息概念。仍讨论可能消息集合 (11.20) 及其概率分布 (11.21)，给每个可能消息 a_i 确定一个效用度 u_i ，表示消息 a_i 的发生对信宿产生的效用， u_i 大表示消息 a_i 的效用大。令

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (11.35)$$

代表信源的有效性分布。考虑有效性的信源信息结构为

$$S = \begin{bmatrix} a_1, a_2, \dots, a_n \\ u_1, u_2, \dots, u_n \\ p_1, p_2, \dots, p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ U \\ P \end{bmatrix} \quad (11.36)$$

有效信息定义为

$$I(P, U) = - \sum_{i=1}^n u_i p_i \log p_i \quad (11.37)$$

u_i 是消息 a_i 的有效性系数。(11.37) 以效用加权的方法对申农信息作出修正，在一定程度上反映了信息的价值。

在人类的信息活动中，消息的形式、内容、价值是统一的，成熟的信息科学需要制定一套理论去完整而统一地描述信息的形式、内容和值因素，把语法信息、语义信息和语用信息综合在一起。

钟义信提出，把综合计及语法信息、语义信息和语用信息的信息称为全信息，把研究全信息的本质和度量方法以及全信息的

运动(变换)规律的理论称为全信息理论。^①这是信息科学未来发展的基本方向。

上面介绍的语义信息和语用信息的定量定义都很不成熟,局限性很大。这是因为,语义信息和语用信息本质上都是无法形式化的东西,简单地仿照申农的做法行不通。看来,这里也应采用定性与定量、形式化与非形式化相结合的方法论原则去处理,要从现代系统理论及其他学科中吸取新的思想和方法。

11.7 信息的特征与实质

维纳于1948年提出一个著名论断:“信息就是信息,不是物质也不是能量。不承认这一点的唯物论,在今天就不能存在下去”^②。维纳把能量与物质作为不同的东西,表明他所讲物质不同于自然科学讲物质,更不同于哲学唯物论讲物质。维纳在这里指的是物质材料或质料,强调区分的是材料、能量和信息。维纳的命题提出信息与物质的关系这个重大问题,引发了关于信息的实质的长期争论。

说到信息的实质,首先应强调的是信息归根到底是物质(一切不依赖于意识的客观存在)的一种属性。信息不能离开物质而单独存在,客观世界和人类大脑中都不存在与物质相分离的信息。一切信息都是由特定的物质运动过程产生、发送、接收和利用的,没有非物质的信源,也没有非物质的信宿。信息的传输离不开物质的通道、线路或介质场,离不开能量的利用。事实上,信源发送的和信宿接收的都不是纯粹形态的信息,而是载带着信息的某种物质形式,叫做信息载体,如声波、光波、电磁波等。通信系

① 参见《21世纪初科学发展趋势》,333~335页,北京,科学出版社,1996。

② 维纳:《控制论》,133页,北京,科学出版社,1962。

统中，信源通过发送信息载体而发送信息，编码器通过变换信息载体而对信息进行编码，信道通过传送信息载体而传送信息，信宿通过接收信息载体而接收信息。

存在三种类型或三个层次的信息载体。第一类是物质材料或物质实体。一切物质材料均可充当信息载体，通过某种物理手段把信源发送的信息刻印或固定在载体上（有时把这类载体称为信息储存体）。固态物质可以做信息载体，如刻石、刻木、刻金、刻骨等；液态和汽态的物质也可以充当载体，如生物的分泌液、气味等。第二类载体是物质的波动信号。一切物质波动信号都可以充当载体，最基本的是声波、光波、电磁波。与第一类载体相比，物质波是更有效的载体，一切非直接接触的通信都需要利用这种载体。第三类是符号载体，如语音、文字、图形、动作以及各种人工语言，包括动物语言。与前两类载体不同，符号被创造出来仅仅是为了载带信息，除此之外不再具有其他功能价值。但符号仍然是某种物质形式，具有一定的直观形态，必须借助前两类载体才能显示自己的存在和作用。

人类生存活动中的信息作业不限于信息的传送，还有信息的感测、采集、表示、固定、变换、加工、处理、存储、提取、控制、利用等。每一种作业中直接操作的都不是纯粹形态的信息，而是包含信息的载体。信息处理是通过对载带信息的符号的加工变换而进行的，数学家通过对数学符号的变换、运算、逻辑推理进行信息处理，文学家通过对语言文字的编排、修饰进行信息处理。所谓信息存储是把文字、图形、语音、图像等符号载体固定于报刊、书籍、磁带之类实物载体上，再把实物载体存储起来。信息对载体的这种依赖性，表明信息归根到底是物质的属性。

信息对物质的依赖性还表现在一切信息运动或作业都需要消耗能量。存在能量流，必定存在信息流；存在信息流，也必定存在能量流。但能量流与信息流不是一回事。通信过程消耗能量多

并不意味着传送的信息量也多。小的能量消耗传送大的信息量,大的能量消耗传送小的信息量,消耗很大能量而没有传送信息,这些情形在实际通信中均可发现。信息流可能与能量流同方向,也可能方向相反。这些事实表明,维纳关于区分信息与能量的意见是正确的。

但必须把信息与一般的物质属性区分开来,才能把握信息的特殊本质。一个突出的特点是信息的不守恒性,而守恒性是物质(包括能量)的基本特性。一定的物质材料和能量,用一点就少一点,用户不能分享。信息则是可分享的。古人和今人同样能从赏月中得到美感信息,不同读者可以从同一本书中获得同样的信息,教师向学生传送知识后不会减少自己的知识,甚至还可能增加自己的知识。物质能量是不灭的,信息却可以生成、失去、增殖、创造。物质、能量经过处理或多或少有所损失,信息经过处理一般都会增殖。教师备课是对知识信息的一种处理,因而可能使自己的知识增殖。

信息的特殊本质在于它是一种可以表征物质客体的成分、结构、状态、行为、功能、属性、演化趋势的东西,一种能表征一切物质属性的物质属性。尤其独特的是表征物质客体属性的信息可以同该客体分离开来,固定在叫做载体的其他物质客体上。严格地讲,一个物质客体的属性只有通过与其他物质客体的相互作用并在其他物体中得到反映或表征,才能称为该物质客体的信息。某物的信息不是该物体本身,不同于一般的物质属性,而是一种只有通过与其他物体相互作用、并在这些物体的变化中才能表现出来的属性。把这种属性叫做信息是非常科学的:所谓“信”,意指它是对象物体属性的反映或表征,即对象(信源)的“信物”,凭借它可以辨别、认证该对象;所谓“息”,意指必须栖息载带在其他物体之上,不是信源本身。某物的信息是表征该物属性而又栖息载带于他物之上的东西。

信息与它所表征的物质客体的这种可分离性，具有极为重要的意义。由于这种可分离性，人们可以不直接接触某物而获取它的信息，可以不改变对象客体而对它的信息进行采集、变换、加工、存取、利用，可以跨越空间和时间进行传送。由于这种可分离性，同一信息可以用不同形式表示，用不同的载体固定，用不同的系统进行传送、加工、存取；不同的信息可以用相同的形式表示，用同类载体固定，用相同的系统进行传送、加工、存取。由于这种可分离性，一个客体虽然早已消亡，有关它的信息却可以长期保存下来，有时还可以借助一定的技术手段把它复制出来。由于这种可分离性，一个客体尚未产生，但人们可以先用符号系统建构它的信息形态，再利用技术手段把它实地建造出来。由于这种可分离性，事物的过去、现在、未来被联系在一起，人们能够立足于现在而回顾过去、展望未来。总之，信息这种物质属性是其他物质属性不可比拟的。

11.8 信息技术

为实施信息的获取、识别、显示、固定、发送、变换、传送、存储、提取、接收、控制、利用等操作所需要的工具设备和方法技能，统称为信息技术。前者是硬技术，后者是软技术。它们都是人体自身的信息功能的直接扩展和外化，是信息科学和自然科学原理物化的结果。主要有四大类信息技术。

信息获取技术 人类在从动物中分化出来之时，只能靠自身的感官获取信息，在空间、时间、环境、信息种类、精度、数量等方面受到极大限制。克服这些限制，借助物质手段扩大获取信息的范围、精度和数量，产生了信息获取技术。古人发明的尺子、磅秤、指南针、地动仪等，近代发明的望远镜、显微镜、听诊器等，都是获取信息的硬技术。中医望、闻、问、切的方法技能，属

于获取信息的软技术。现代社会各种大型复杂的生产、科研、军事、政治、文体活动等，要求高精度、高效率、高可靠性地获取各种形式的信息，创造了各种类型的信息感测技术和显示技术，核心是传感器技术。能够灵敏地感受人体器官不能直接感受的信号，并转变为便于接收、显示、加工、传送的信号，是对传感技术的基本要求，相应的功能器件称为传感器。社会信息的采集离不开必要的感测设备（硬技术），还需要组织方法之类软技术，统称为信息采集技术。

信息传送技术 即通信技术。人自身发送信息的器官主要是语声系统，行为器官及其他可以在意识支配下动作的器官也能发送某些信息；各种感官都是接收信息的器官。用人体之外的物质手段进行通信的是通信技术。烽火通信是古人发明的光通信技术。发明文字后，主要通信手段是书信。这些都算不上真正的通信技术。现代通信技术是信息的发送技术、传送技术、编码技术、抗噪声技术、译码技术的总称。信息传送技术实质是信道技术，包括人工信道的设计和天然信道的利用等技术。按照接收信号的物理形式，可划分为机械信道、声信道、光信道、电信道、电磁信道。电信道分为有线的和无线的两大类。光通信中最具吸引力的是光导纤维，即一种直径只有1微米~100微米的玻璃丝，能引导光信号通过。光纤的通信容量极大，不受空气中尘雾、战场硝烟的干扰，可靠性高，保密性好，是一种极有前途的通信技术。

信息处理技术 由感测器件得到的是原始信息，精粗未分，真伪混杂，难以有效利用。对原始信息进行加工，去粗取精，去伪存真，由此及彼，由表及里，形成能反映事物本质特性并便于利用的信息形式，这种作业称为信息处理。人自身的信息处理器官主要是大脑。把这种信息处理方式物化，就是信息处理技术，包括加工信息的工具设备和技能、方法、程序、算法等。算盘是古代的信息处理技术。现代意义的信息处理包括信息的分类、识别、

变换、计算、筛选、整理、排序、制表等易于程序化的内容，也包括分析、综合、抽象、演绎、证明等更深层次的信息处理。现代信息处理技术主要是电子计算机技术。

信息存取技术 把暂时不用或需要反复使用的信息存储起来，需要时再把它提取出来，这种信息作业称为信息的存取。人类自身的信息存取器官也是大脑，“记”是存储，“忆”是提取。结绳记事是最古老的信息存取技术。发明文字是人类信息存取手段的伟大革命，极大地提高了人类存取信息的能力。但这些都算不上真正的技术。现代信息存取技术主要是：（1）信息记载技术，最重要的是录音、录像技术；（2）缩微技术，即把信息载体缩小、微化，以便于高密度地存储信息；（3）数据库技术，建立通用的综合性数据仓库，收集并保存有关企业管理、科技发展、医疗保健、教育、经济、新闻等数据资料，用统一的方式保管，以供不同用户共享；（4）信息检索技术，即根据用户需求，准确、快速地从库存资料档案中找寻并取出所需信息。这些信息作业都需要利用计算机技术。

重要的现代信息技术都是上述各种技术的综合应用，这里介绍以下几种。

卫星技术 从信息获取技术的角度看，人造卫星是一种功能强大的感测技术，使遥感遥测技术发展到一个前所未有的水平。地球上许多巨大尺度的信息在地球上是无法获取的，如地下资源、地下水道、全球环境态势、外国的某些军事动向等，均可以利用卫星获取之。由此发明了资源卫星、气象卫星、侦察卫星等。利用卫星进行太空探测，更是其他技术无法替代的。利用人造卫星搞通信，覆盖面积大，通信线路多，信息容量大，通信质量高，卫星通信是实现社会信息化、人类世界系统化不可缺少的通信技术。

信息高速公路 把信息与高速公路连在一起，是一种形象的说法。信息高速公路是一种把各种现代信息技术综合在一起的高

速信息网络，由通信网（一系列可互联、互通、互操作的各种通信网络）、信息（各种公用和专用的数据库、各种数字化的影视、报刊、书籍等）计算机系统和人（建设和经营高速网络的人、基于高速网工作、学习、生活的人）等因素组成，是信息化社会的基础设施。

· 多媒体 媒体即信息载体。多媒体技术即综合应用多种信息载体的技术，以计算机为核心，把文字、图形、图像、声音等多种信息形式有机地结合起来，形成一种人机交互的综合处理多种媒体信息的功能。

虚拟现实 Virtual Reality 的直译，钱学森称之为灵境，也有人提议称为临境。灵境技术是一种由计算机硬件、软件和各种先进的传感器构成的人工信息系统，可以逼真地模拟各种复杂的现实环境，让人产生身临其境的感觉。

现代信息技术的核心是计算机技术，正日新月异地发展着。一方面追求更高的速度、更大的容量、更多的功能、更方便的操作，一方面追求更高、更新的设计模式，如神经计算机、模糊计算机、混沌计算机、量子计算机。随着脑科学、认知科学及纳米技术等高技术的发展，计算机技术的未来发展是今天的人们难以预料的。

11.9 信息与系统

信息是一种系统现象，至少要有信源和信宿或载体才可能谈论信息，有相互作用才有信息。或者是不同系统通过相互作用而一个的特性在另一个中得到反映、表征，或者是同一系统的不同组分之间相互作用而相互反映、表征。不存在与系统无关的信息，也不存在没有信息的系统。有元素之间、子系统之间、层次之间相互作用，有系统与环境之间的相互作用，就有信息的产生和交换。系统的形成、发展、运行都离不开信息活动。

最低级的信息活动是两个物体在直接作用、碰撞中相互反映或表征。在这个层次上，有力的作用就有信息，对作用力的度量就是对信息的某种度量，但不能说“力就是信息”，力不是系统科学的概念，所谓“组织力”只是一种泛化的说法。这类系统的信息量很少，信息水平和效率最低，没有进化出专门从事信息作业的子系统。迄今为止，研究这种对象的科学可以不用信息概念。像生物那样的系统已进化出专门从事信息作业的子系统，信息含量巨大，信息活动丰富复杂，信息水平和效率很高。深入研究这种系统的科学需要信息概念，如分子生物学就是基于信息概念解释生命现象的。最高级的信息活动是利用语言和符号进行的，是人和人类社会特有的信息活动。人是唯一的信息化的存在物，有关人的科学、社会科学总是这样或那样使用信息概念。描述未来的信息社会的科学更离不开信息概念，信息将成为未来社会科学的中心概念。

信息的系统意义在直观上是很明显的。统计物理学的奠基人波尔兹曼最早把熵与信息联系起来，认为熵的获得意味着信息的丢失，熵是一个系统丢失了的信息的度量。薛定谔提出负熵概念。维纳接受并发展了这些思想，提出信息是负熵、是系统组织程度的度量等著名论断，深化了人们对信息的系统意义的理解。但这些提法思辨色彩颇浓，难以作深入的拓广和定量的表述。

在基础科学层次上，系统研究越来越需要信息概念。普利高津试图把信息概念引入耗散结构理论，用分子之间的通信来解释物质系统的自组织运动。哈肯出版专著《信息与自组织》，试图推广信息概念，按信息原理阐述一般自组织过程，用信息概念定义复杂性。艾根认为生命起源过程存在信息危机，把超循环看作克服信息危机必需的系统机制，建立他的分子自组织理论。钱学森把信息学作为建立系统学的重要构筑材料之一，在建立系统学的早期努力中把信息列入系统学的基本概念框架中，只是在发现目

前难于给出信息的一般定义和数学表示之后，才提出暂时撇开信息问题。圣塔菲的学者同样重视从信息角度阐述复杂性。虽然这些系统科学大家的努力目前都未能达到预定的目标，但“英雄所见略同”，他们的努力表明系统科学未来发展的一个重要方向。第11至16章将表明，技术科学层次的系统研究离不开信息概念。信息与系统应是整个系统科学部门的两个中心概念。

思 考 题

1. 试从哲学、基础科学、技术科学和日常生活的不同层次或角度阐述信息概念。
2. 既然信息是通信中消除了的不确定性，为什么有时系统因收到某种信息而从有序走向混乱（如获悉亲人不幸遭遇的信息后引起心理混乱）？
3. 如何理解维纳的名言：“信息就是信息，不是物质也不是能量。”
4. 试对编码和译码作出认知科学的分析。
5. 说明申农通信系统模型对于理解广义通信（如新闻传播）的意义和局限。

阅 读 书 目

1. 苗东升：《系统科学原理》，第3、5章。
2. 藤田広一：《基础信息论》，第1、2、4、5、6章，北京，国防工业出版社，1982。
3. 钟义信：《信息学漫谈》，北京，科学普及出版社，1984。
4. 维纳：《人有人的用处》，第2、3、4、6、7章，北京，商务印书馆，1989。

5. 冯国瑞：《信息科学与认识论》，第 1、3、7 章，北京，北京大学出版社，1994。

第12章 控制学

对于什么是控制学，不同学者有不同的提法。

按照维纳的意见，控制学是关于动物、机器和社会的控制与通信的科学。这样界定的控制学不限于技术科学层次，层次不清楚，与维纳本人的研究实践相符合。

根据钱学森关于系统科学的学科层次划分，黄琳提出控制学“是研究在一定限制条件下，发挥能动性以实现对系统的控制的一门技术科学”^①。这个定义点明了控制学是关于发挥能动性的科学，有新意。钱学森最近关于控制学是讲系统成员关系的人为调控以达到系统整体运行优化的提法，坚持了技术科学的观点。这两种提法忽略了对生物体和自然界的自控行为的研究，显得窄了点，有明显的工程控制学背景。

目前控制学最成功的应用仍是工程控制问题，但同时在生物控制、经济控制和社会控制等领域也取得不少进展。

曾庆存近年又提出自然控制问题，倡导建立一门研究自然界的自控（自组织）行为及其人工调控的理论，以使用统一的观点、理论和方法研究众多的与调控自然环境有关的具体问题，并发展相应的工程技术^②。

① 黄琳：《控制理论发展过程的启示》，载《系统工程理论与实践》，1990（1）。

② 参见《21世纪初科学发展趋势》，251～252页，北京，科学出版社，1996。

12.1 系统与控制

控制的概念是很普遍的，工程技术中的调节、补偿、校正、操纵，社会过程中的领导、指挥、支配、管理、经营、教育、批评、制裁等，都是一定的控制行为。在生命过程中，中枢神经活动是一种控制过程。广义地讲，因果关系是原因对结果的控制。控制学的创始者都把因果关系作为这门学科的哲学基础。

控制是一种系统现象。撇开具体内容来看，凡控制总要涉及施控者和受控者两种实体，控制是施控者影响和支配受控者的行为过程，如图 12.1 所示。

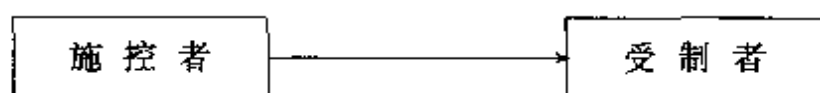


图 12-1

控制是一种有目的的活动，控制目的体现于受控对象的行为状态中。受控对象必有多种可能的行为和状态，有些合乎目的，有些不合乎目的，由此规定了控制的必要性：追求和保持那些合目的的状态，避免和消除那些不合目的的状态。只有一种可能状态的对象没有控制的必要。控制是施控者的主动行为。施控者应有多种可供选择的手段作用于对象，不同手段的作用效果不同，由此规定了控制的可能性：选择有效的、效果强的手段作用于对象。只有一种作用手段的主体实际上没有施控的可能性。控制就是施控者选择适当的控制手段作用于受控者，以期引起受控者的行为状态发生合目的的变化，或者呈现有益的行为，或者抑制并消除不利的行为。所以，控制就是选择，没有选择就没有控制。

控制与信息是不可分的。在控制过程中，必须经常获得对象运行状态、环境状况、控制作用的实际效果等信息，控制目标和

手段都是以信息形态表现并发挥作用的。控制过程是一种不断获取、处理、选择、传送、利用信息的过程。所以维纳认为：“控制工程的问题和通讯工程的问题是不能区分开来的，而且，这些问题的关键并不是环绕着电工技术，而是环绕着更为基本的消息概念，不论这消息是由电的、机械的或是神经的方式传递的。”^①

要对受控者实施有效的控制，施控者应是一个系统，由多个具有不同功能的环节（工程系统中常称为控制元件）按一定方式组织而成的整体，称为控制系统（有时也把受控对象作为环节包括在内）。控制任务越复杂，系统的结构也越复杂。撇开具体控制系统的特性，仅从信息与控制的观点看，主要控制环节有：（1）敏感环节，负责监测和获取受控对象和环境状况的信息，相当于人体的感官；（2）决策环节，负责处理有关信息，制定控制指令，相当于人体的大脑；简单的系统只须将实际工作状况的信息同预期达到的状况进行比较，称为比较环节（元件）；对于复杂系统，如航天飞机、社会组织等，处理信息、作出决策是一项繁重的任务，比较元件无法胜任，须以电脑作为决策环节；（3）执行环节，根据决策环节作出的控制指令对对象实施控制的功能环节，相当于人体的执行器官手、脚等；（4）中间转换环节，在决策环节和执行环节之间，常常须有完成某种转换任务的功能环节，如放大环节、校正环节等，最重要的是放大环节，因为从比较环节输出的信号一般都是微弱的，无法驱动执行环节，须将其放大；校正环节等则是为改善系统动态品质而设置的。这些环节按适当的方式组织起来，就能产生所需要的控制作用这种系统功能。这也是一种整体突现性。控制理论惯用方框表示功能环节，用多个功能环节连接成的方框图表示控制系统。图 12.1 就是一种系统方框图。

现实世界的系统分为有控制的和无控制的两类。控制学只研

^① 维纳：《控制论》，8 页。

究有控制的系统。在物质世界的进化史中，低级的系统中没有专门负责对各组成部分以及整个系统的行为进行调节控制的子系统，必要的调节活动是通过组分之间动态的相互作用或环境的限制而实行的，贝塔朗非称为初级调节。物质世界沿逐步复杂化方向演化到一定阶段，仅靠初级调节方式不足以满足复杂系统的需要，开始分化出专门负责对整个系统调节控制的子系统，贝塔朗非称其为二级调节。所以，从无控制到有控制是物质世界进化的结果。在后续的进化中，出现越来越高级精致的控制方式，直到生命机体的控制系统。

12.2 控制任务

一定的控制过程有一定的控制任务。按照控制任务的不同，可将控制系统分为以下几类。

(1) 定值控制

在某些控制问题中，控制任务是使受控量 y 稳定地保持在预定的常值 y_0 上，称为定值控制。实际存在的干扰因素使 y 偏离 y_0 ，控制任务就是抑制和克服干扰的破坏作用，使系统尽快恢复原状态，故又称为镇定控制。实际过程并不要求严格保持 $y=y_0$ ，只要求 y 对 y_0 的偏差 $\Delta y=y-y_0$ 不超过许可范围。

图 12.2 是一个室温控制系统。室温 T 是受控量，控制任务是保持室温于 T_0 （例如 18°C ）。天气的变化，锅炉燃烧情况的波动，是引起室温起伏变化的干扰因素。模盒是温度敏感元件，随时监测室温 T 。 T 与 T_0 比较形成温差 $\Delta T=T-T_0$ 。当 $|\Delta T|$ 大于允许值时，误差信号经过传送放大，驱动阀门开大或关小，改变锅炉燃烧情况，以消除温差 ΔT ，使室温 T 保持在 T_0 附近的许可范围内。

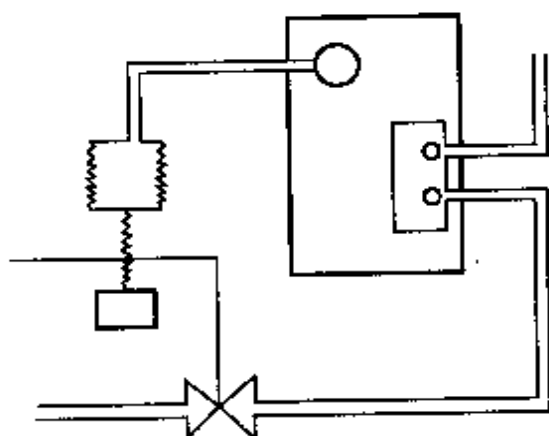


图 12.2

定值控制是最简单的控制任务。人的体温和血压的控制，飞行器巡航速度的控制，供电系统电压频率的控制，都是定值控制。社会系统也有这类控制。

(2) 程序控制

在定值控制问题中，输入量或控制作用是常数， $u=c$ 。但多数控制过程中的控制作用随时间而变化， $u=u(t)$ 。如果 $u(t)$ 的变动规律能够预先精确确定，可以将 $u(t)$ 的变化规律作为一种程序表示出来，控制任务就是执行这个程序，因而称为程序控制。在结构实现上，这种控制须有专门机构储存程序，称为程序机构。在系统运行过程中，程序机构给出预定的程序，指挥控制系统工作，保证受控量按照程序而变化。定值控制可看作程序控制的特例。

采用程序控制的系统相当广泛。在工程技术领域，时钟的转动，程控机床的运行，要靠程序控制。在生命领域，个体从卵细胞开始的发育，昆虫的变态，要靠程序控制。在社会领域，大至国家执行五年计划，小至学校执行教学计划，个人按日程表处理事务，都是程序控制。

(3) 随动控制

输入控制量 $u(t)$ 一般取决于外部过程，其变化规律往往不能预先确定，无法作为程序固定在程序机构中。例如防空作战，敌机从何时何地起飞、按什么航线飞行不得而知，特别是敌机有意作机动飞行时，其飞行路线无法预先确定。为对付这种情况，火炮的控制系统必须在工作过程中随时监测敌机路线的变化，即 $u(t)$ 的变化，并相应地改变输出量 $y(t)$ ，控制任务是使 $y(t)$ 随着 $u(t)$ 的变化而变动，因而称为随动控制。鉴于控制任务是保证系统的输出或状态跟踪一个预先不知道的外来信号，又称为跟踪控制。程序控制是随动控制的特例：随程序变动而变动（或跟踪程序）。

随动控制极为普遍。火炮控制，雷达天线控制，射猎禽兽的猎枪控制，在需求量的改变无法预测的条件下对产品生产的控制，都是随动控制。当敌机作机动飞行时，导弹上的自动控制系统不断监测敌机的位置和速度，不断调整导弹的飞行路线，逐步缩小差距，直到最后击中敌机。这是最典型的随动控制。

不同的受控过程要求不同的控制思想和控制方式。实际应用中，常常将定值控制、程序控制和随动控制中的两种或三种结合起来使用。执行一项建设任务，既要有执行预定计划的程序控制，又要根据实际情况的变化而调整计划，实行随动控制。复杂工程系统的控制也常有这种情况。在生物机体中，既包含体温的定值控制，又有生物钟之类程序控制，还有呼吸的节奏和深度跟踪躯体的用力不同而变化之类随动控制。

（4）最优控制

镇定控制、程序控制和随动控制的控制任务可以统一表述为：保证系统的受控量和预定要求相符合。三者的区别在于这种预定要求是固定的还是变化的，变化规律是预先知道的还是只能在工作过程中实时监测的。但是，许多实际过程的控制任务不能作这种表述。在这类过程中，关于受控量的预定要求不仅不能作为固

定值在系统中标定出来,或者作为已知规律引入系统作为程序,甚至无法在系统运行中实时获取。这类过程的控制任务应该表述为:使系统性能达到最优。例如,在宇宙航行问题中,要求控制飞行器达到预定目标所需时间最短,或者要求消耗的能量最少;在经济系统管理中,要求对有限资源实行最优分配,或者对库存实行最优控制。这是对控制系统要求更高的一种控制。

对系统的性能要求是多方面的,不同的性能要求常常相互矛盾,不可能各种性能同时达到最优。解决任何控制问题都受到既定条件的限制,如空间的限制、时间的限制、资金的限制等。最优控制概念的完整表述是:在满足既定限制条件的前提下,寻找一种控制规律 $u(t)$,使得所选定的性能指标达到最佳值。最优控制代表一种控制原理,一种控制技术,是现代控制理论和技术的重要组成部分。

12.3 控制方式

给定控制任务后,要用一定的控制方式去实现。控制是一种策略性的主动活动,实现同一控制目标可以有不同的控制方式,构成不同类型的控制系统。基本的控制方式有三种。

(1) 简单控制

例1 教育子女是一种控制过程。许多父母管教子女的方法可以图示为

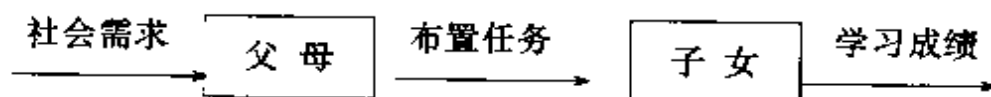


图 12.3

这是一种最简单的控制策略,可以用框图一般地表示为

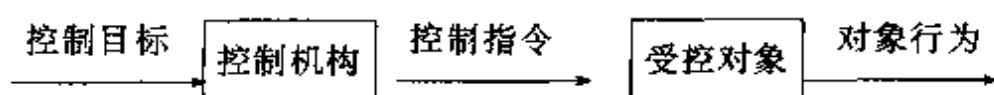


图 12.4

简单控制方式的特点是，不考虑系统承受的外部干扰，也不管对象执行控制指令的效果如何，只根据控制目标的要求和关于对象在控制作用下的可能行为的认识来制定控制指令，让对象去执行。简单地说，就是只布置任务，不检查效果。

当外部干扰可以忽略不计，对受控对象的运行规律有确切的了解（事先的或实时的），能够制定出详尽可行的控制指令，且对象能忠实执行指令，在这种情况下简单控制策略是可行的。其优点是结构简单，使用方便，经济性好。简单环境中的简单系统都可能采取这种控制方式。程序控制原则上可以采用这种控制方式。随动控制也可以采用这种方式。官僚主义的领导必定是这种控制方式。但这并不意味着简单控制一定是不好的，当控制任务比较单纯、环境情况简单、部属素质高时，采取简单控制方式领导部属往往能收到举重若轻的效果。

（2）补偿控制

如果外部干扰对系统的影响不可忽略，或对象不能忠实地执行控制指令，简单控制方式的效果必定很差。在许多情况下，对这类对象可以采用补偿控制方式。

例 2 有些工厂生产过程的控制采取下图所示的方案

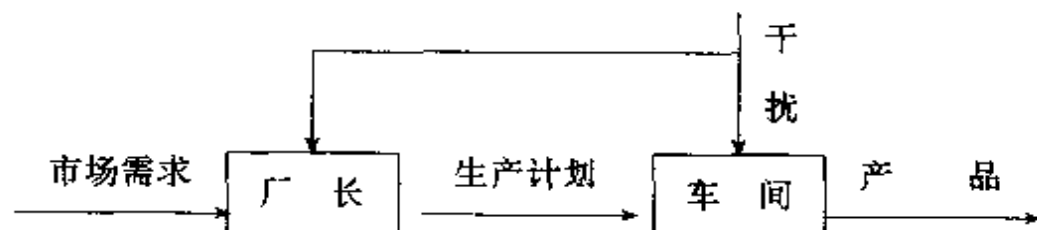


图 12.5

这种控制方式的特点是，在依据控制目标制定控制指令的同

时，实时地监测外部干扰，计算为抵消干扰可能造成的影响所需要的控制作用，并反映在控制指令中，通过控制把干扰的作用补偿掉。比较图 12.4 与 12.5 可知，简单控制加上抵消干扰的补偿措施，就是补偿控制。由于能够在干扰作用引起对象严重偏离目标之前就采取措施去抵消干扰的影响，这种方式称为补偿控制。通俗地讲，就是“防患于未然”。从信号传送看，干扰作用在造成明显影响之前已被传送到决策机构去处理，未构成信息流通的闭合回路，又称为顺馈控制。

补偿控制要通过设置补偿装置来实现。为实时监测并抵消干扰的影响，需要有灵敏的测量装置和有效的补偿装置，技术要求一般比较复杂。关键是掌握系统运动规律和扰动的特性，有能力获取扰动信息并补偿扰动的影响。如果只有少量干扰作用且便于监测，又拥有抵消干扰的手段，这种控制方式是可行的。工程系统中不难发现补偿控制的实例。一种流行病出现之前医院给居民打预防针，就是一种补偿控制。一项社会实践活动开始之前，首先进行思想教育，针对可能出现的不利因素采取预防措施，也是补偿控制。如果干扰作用变量多、影响大，或者出现未曾料到的干扰作用，难以监测；或者虽然获得有关干扰的信息，但没有足以抵消其影响的补偿手段，则不宜采用补偿控制，有效的办法是采用下述反馈控制方式。

(3) 反馈控制

反馈控制的一般框图为

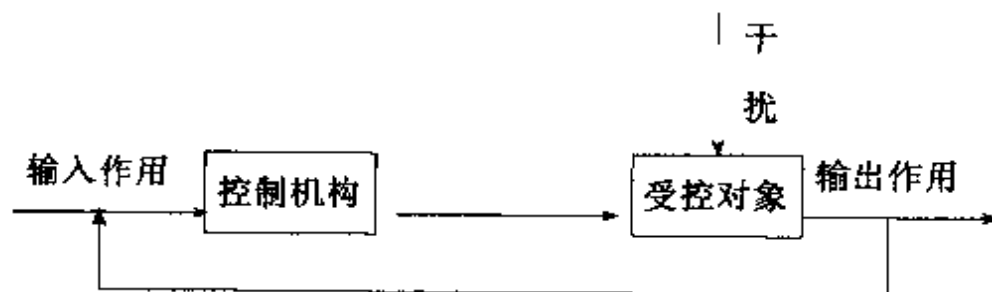


图 12.6

反馈控制方式的特点是，不去监测干扰作用，不采取事先抵消干扰影响的补偿措施，只监测受控对象的实际运行情况，把输出变量的信息反向传送到输入端，与体现目标要求的控制变量进行比较，形成误差，根据误差的性质和大小决定控制指令，去改变对象的运行状况，逐步缩小并最后消除误差，达到控制目标。控制方案的着眼点是消除对象实际运行情况与预定状况之间的不一致，即消除误差。但只有存在一定的误差，控制系统才能启动和工作。这是一种以误差消除误差的控制策略，因而也称为误差控制。完全消除误差是不可能的，但要求通过控制把误差限制在许可的范围内。简单地说，反馈控制的特点是不但布置任务，而且检查执行效果，“赏罚分明”，根据对象的实际表现调整控制指令，直到达到控制目标。

在线路结构上，误差控制要求设置反馈环节，形成从输出端到输入端的信息反馈通道。从输入端到输出端的前向信息通道，加上反馈通道，构成一个闭合的信息通道。这是反馈控制的一大特点，故常称为闭环控制。简单控制和补偿控制都没有闭合的信息通道，称为开环控制，二者的差别是有无补偿线路。开环控制优点是结构简单，缺点是控制精度低，抗干扰能力差，对系统参数的变化敏感。

图 12.6 中的控制机构也是一个系统，由各司一定控制职责的控制环节或元件按一定方式耦合而成。如果把这些环节或元件表示出来，再加上反馈环节，可得到如图 12.7 所示的最简单的闭环控制系统框图。

令 e 记误差，仍以 u 、 y 分别记输入作用和输出作用，则有

$$e(t) = u(t) - y(t) \quad (12.1)$$

对于镇定控制， $u(t) = y_0$ ，于是有

$$e(t) = y_0 - y(t) \quad (12.2)$$

图 12.2 所示室温控制器就是一种反馈控制系统。工程系统的

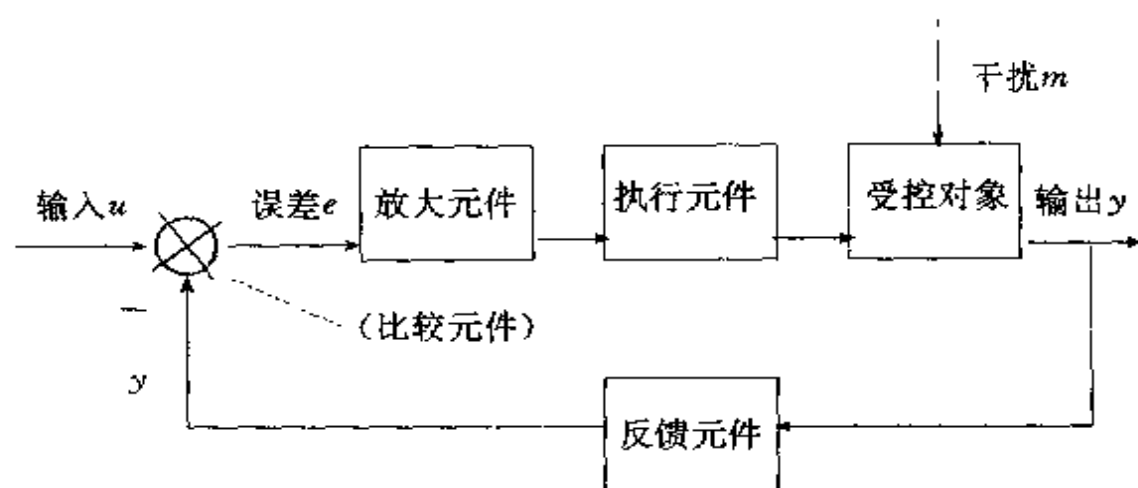


图 12.7

控制大量采用反馈策略。生命机体适应环境的能力主要靠反馈控制，通过反馈控制不断缩小与环境要求的“差距”来达到适应环境。社会系统也广泛存在反馈控制，调查、信访、民意测验，都是获取反馈信息的手段；民主、法制建设都需要有充分、快速、准确的信息反馈通道。真正“举重若轻”式的领导也要通过实行赏罚分明、得当的反馈控制才能建立起来。一切系统自学习的主要机制是反馈，通过反馈修正错误，积累经验，求得进步。

复杂的控制过程常常要在图 12.7 所示主反馈通道之外再设置若干局部反馈通道，称为多重反馈，形成复杂的反馈网络结构。

镇定控制与补偿控制既可以采用开环控制策略，也可以采用闭环控制策略，视控制问题的复杂程度以及对控制精度的要求而定。随动系统一般采用闭环控制策略，随时监测误差，以误差驱动系统去消除误差，达到控制目标。反馈控制的优点是结构比较简单，控制效果好，对系统参数变化不敏感。但若控制系统设计不当，可能出现反馈过度，或反馈不足，或反馈延迟，或反馈中断，都会影响控制效果，严重时导致控制失效。

实际控制过程有时将反馈控制与补偿控制结合起来，形成复合控制，能获得更好的控制效果，但结构也更复杂。

12.4 控制系统的数学描述

控制学是一门精确的定量化科学，要求用数学方法描述系统的状态、行为、性能，作出定量的结论，指导系统设计。建立和求解数学模型，通过对模型解的分析把握系统特性，是用控制学方法研究问题的基本作业。

控制学一般把系统看作确定性的，在确定性的输入作用（原因）的激励下，系统以确定性的输出作用（结果）响应。输入-输出观点在控制学中起着非常基本的作用，贯穿于对控制的各种定义中。输入 $u(t)$ 与输出 $y(t)$ 之间的激励-响应关系

$$y(t) = F[u(t)] \quad (12.3)$$

是控制系统最基本的特性。研究控制系统，重要的是了解在一定的输入作用下系统将有怎样的输出，为得到预期的输出，应当选择怎样的输入作用。至于系统内部的具体过程（物理的或生命的或社会的等等），对经典控制学并不重要。这就是著名的黑箱原理。一个物体或系统，如果无法或者不允许打开，不能获得其内部结构和运行机制的信息，便称为黑箱。被当作黑箱的事物并非不可研究和控制。黑箱也有其外部特征和参数可供观测，通过它们可以对内部特性有所了解。输入和输出就是这种外部特征。凡是不把对象分解为组成部分，不是从研究结构及内部机制入手去了解系统，而是通过外部观察和试验，输入一定的激励作用，测记产生的输出响应，通过对输出数据、资料的分析来了解系统的行为特性，找到排除故障、实施控制的方法，都称为黑箱方法。医生治病，技师检查密封仪器，使用的都是这种方法。

从输入-输出观点看，控制系统是一种变换传递装置，其作用是对输入量进行变换、传递以得到输出量，激励-响应特性就是这种变换传递特性。控制学描述这种特性的定量概念，叫做传递函

数,是由系统的输入量和输出量经过适当数学处理(拉氏变换)建立的。令 W 记系统的传递函数, U 、 Y 记经过数学处理的输入与输出,则系统的激励-响应关系可表示为

$$Y=W \cdot U \quad (12.4)$$

表示输入乘以传递函数就是输出。由此得到传递函数的定义

$$W=\frac{Y}{U} \quad (12.5)$$

控制系统的运行都是动态过程,输入量 u 、输出量 y 、状态量 x 、干扰量 m 都是时间 t 的函数, x 对 u 或 m 、 y 对 u 或 m 的响应都是动态响应,即需要经过一定的过渡过程才能建立起稳态响应特性。动态方程是在时间域上描述系统,数学处理上有其不便之处。经典控制理论引入拉氏变换对动态方程进行处理(具体内容请参看有关专著),把传递函数、输入、输出均表示为复数 S 的函数 $W(S)$ 、 $U(S)$ 、 $Y(S)$,得到

$$W(S)=\frac{Y(S)}{U(S)} \quad (12.6)$$

传递函数是输出的拉氏变换除以输入的拉氏变换。或者是写作

$$Y(S)=W(S) \cdot U(S) \quad (12.7)$$

给定动力学方程,施行拉氏变换,按(12.6)可得传递函数。没有动力学方程,可用实验方法获得传递函数。

经典控制理论研究的是工程系统的控制问题。这类系统的各个控制环节也是动态系统,可以根据力学的或电磁学的原理建立它们的动力学方程。从系统科学的角度看,这些控制环节可归结为惯性环节、振荡环节、放大环节、积分环节、一阶微分环节、二阶微分环节等少数几类,动力学方程都比较简单。设系统的组成环节和结构线路已定,先建立各环节的动力学方程,施行拉氏变换,求得各环节的传递函数,再根据各环节的耦合方式,即可直接综合得到整个控制系统的传递函数。设开环控制系统由 k 个环节组成,传递

函数分别为 $W_1(S)$, $W_2(S)$, $\dots$, $W_k(S)$, 如图 12.8 所示

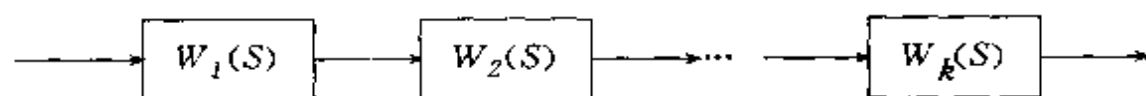


图 12.8

则系统的传递函数为

$$W(S) = W_1(S)W_2(S)\cdots W_k(S) \quad (12.8)$$

图 12.9 所示为一个闭环系统。它的前向通路相当于一个开环系统，可按 (12.8) 式得到其传递函数，记作 $W_1(S)$ ，反馈环节的传递函数记为 $W_2(S)$ 。

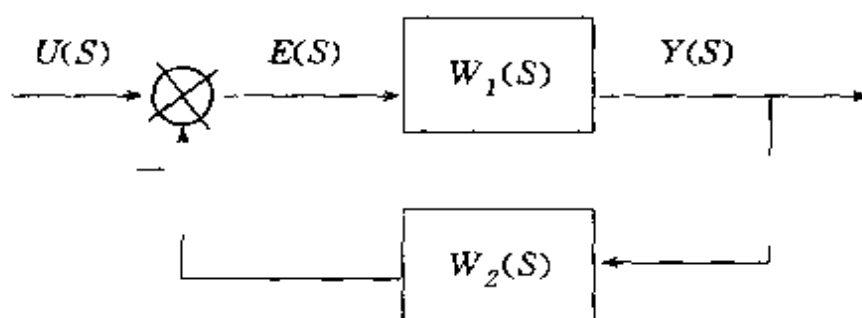


图 12.9

由上图知

$$E(S) = U(S) - W_2(S)Y(S) \quad (12.9)$$

$$Y(S) = W_1(S)E(S) \quad (12.10)$$

整理得

$$[1 + W_1(S)W_2(S)]Y(S) = W_1(S)U(S) \quad (12.11)$$

由此得到系统的传递函数

$$W(S) = \frac{W_1(S)}{1 + W_1(S)W_2(S)} \quad (12.12)$$

建立系统的传递函数，分析传递函数的特性，是经典控制理论的基本方法。但基于黑箱原理的传递函数方法着眼于输入-输出关系来描述系统，不考虑系统的内部状态，有很大局限性。对于

经典理论研究的单输入单输出定常线性系统,这种方法足够有效,特别是研究系统的频率特性。也可以处理某些简单的非线性控制系统。现代控制理论主要研究时变系统、复杂非线性系统、多输入多输出系统,在考察外部特性的同时,需要全面描述系统的内部状态和特性,以及内部特性与外部特性的关系,还要处理各种随机因素。传递函数方法远不能满足这些要求,需要使用状态空间方法,即同时用状态方程(向量形式)

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \quad (12.13)$$

和输出方程

$$Y(t) = C(t)X(t) + D(t)U(t) \quad (12.14)$$

来描述(见 8.3 节)。本书第 3~9 章介绍的方法为状态空间描述提供了基本理论依据,这里不再进一步涉及。

理论上讲,状态空间方法基于所谓白箱原理,即假定系统的内部信息可以完全掌握。介于黑箱与白箱之间的是灰箱,系统的内部信息只能部分地了解。邓聚龙的灰色控制理论就是为处理这类系统的预测和控制而建立的。

12.5 控制系统的性能指标

可以把图 12.7 简单表示如下

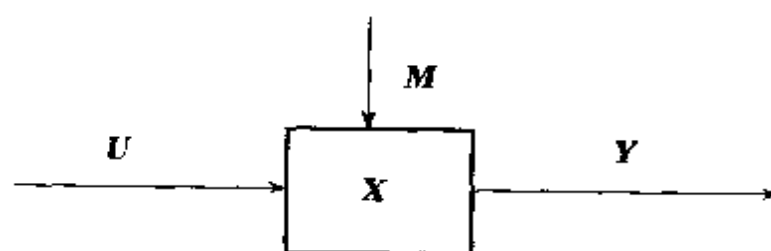


图 12.10

图中 U 、 M 、 X 、 Y 均为向量形式,输入分为两类,一是控制作用 U ,一是干扰作用 M 。控制系统的基本特性,即响应特性,也分两类:

- (1) 输出对输入的响应, 又分为
 - 1) 输出 Y 对控制作用 U 的响应特性;
 - 2) 输出 Y 对干扰作用 M 的响应特性。
- (2) 状态对输入的响应, 又分为
 - 1) 状态 X 对控制作用 U 的响应特性;
 - 2) 状态 X 对干扰作用 M 的响应特性。

控制学是为设计和使用控制系统服务的。设计控制系统是为了获得预期的功能, 系统能给我们提供什么样的功能取决于它的性能。系统的性能要通过一定的品质指标来衡量。对于控制系统, 主要关心以下几类性能及品质指标。

(1) 稳定性与稳定裕度

稳定性是对控制系统必要的和起码的要求, 只有稳定运行的控制系统才有可能发挥预定功能, 实现控制目标。稳定性是一种定性要求。但对控制系统往往还要求它具有必要的稳定裕度, 通俗地讲, 就是稳定性的“富裕程度”。处于稳定边缘的系统参数稍有变化就可能丧失稳定性, 很不可靠, 实际上不能使用。具有足够稳定裕度的系统才可使用。控制学提供了许多判别控制系统稳定与否的方法, 由于技术性太强, 这里略去不讲。

(2) 控制的精确性 (控制精度, 或稳态误差)

不论采用哪种控制方式和技术, 都不可能完全精确地达到预定目标。仅就定值控制来讨论。设受控对象在干扰作用下偏离预定值 y^* , 控制系统开始工作以消除误差, 经过一段瞬态过程而到达稳态值 y_s , 仍存在稳态误差 e_s ,

$$e_s = |y_s - y^*| \quad (12.15)$$

控制活动结束后受控量达到的稳态值与预定值之差的绝对值, 就是控制精度。如图 12.11 所示。原则上说, 控制精度越高, 系统的性能越好。但实际做不到也无须绝对精确, 精度越高, 代价越大, 精度过高并不合算, 使误差不超过某个许可范围就行了。

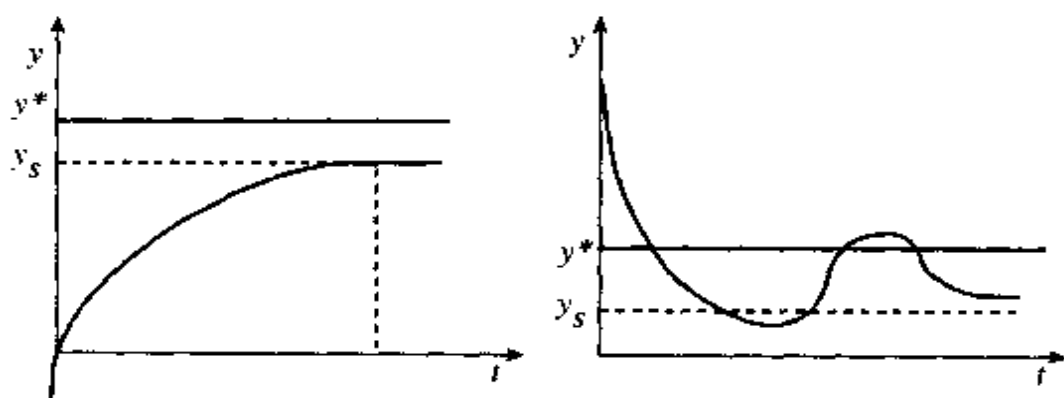


图 12.11

(3) 过渡过程特性

作为动态系统，受控量对干扰作用和控制作用的响应都是动态响应，需要经历一定的过渡过程。用户对控制系统的过渡过程特性有多方面的品质要求。主要有：

1) 快速性与过渡过程时间 T 从数学上讲，动态系统要经历无限长的过渡时间才能结束瞬态，进入稳定定态。实际动态系统虽然在有限时间即可结束过渡过程，但时间可能拖得很长，实际系统都要求尽快结束过渡状态，有些系统对过渡时间有严格的要求。这就是对控制系统的快速性要求，用过渡过程时间 T 等指标来衡量。如图12.12所示，虚线为允许的误差范围。时间函数

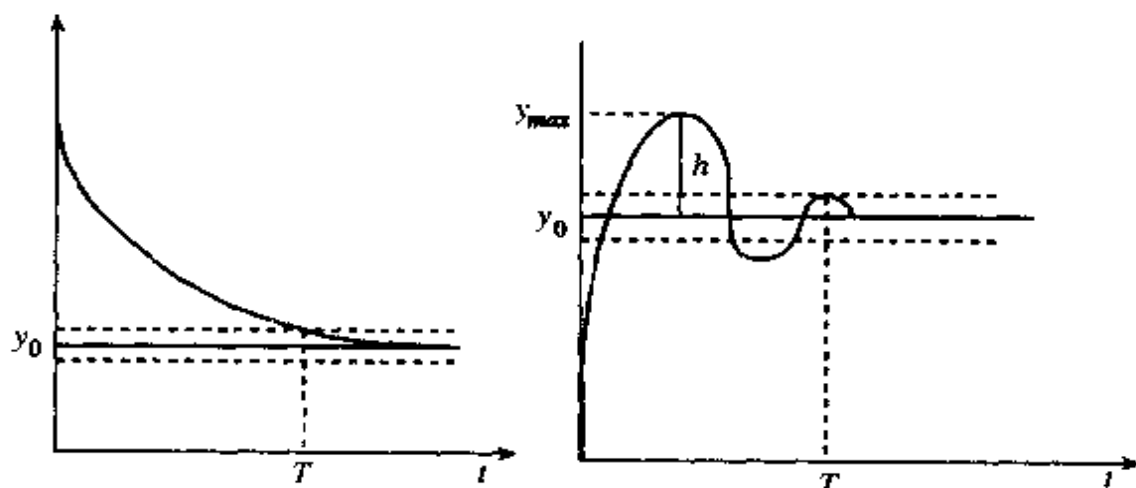


图 12.12

$y(t)$ 进入误差允许范围后不再越出边界的最小时间 T , 称为过渡过程时间。

2) 平稳性和超调量 h 许多控制系统的过渡过程是振荡式的, $y(t)$ 多次从不同方向超越预定值 y_0 线, 起伏不定。令 $y_{\max}$ 为过渡过程中 $y(t)$ 的最大值, h 记超调量, 定义为

$$h = |y_{\max} - y_0| \quad (12.16)$$

过渡过程一般都要求是平稳的, 不平稳的过渡会给系统生存发展带来许多不利, 有时导致系统破坏。存在超调量不利于平稳过渡, 超调量是衡量过渡过程平稳性的定量指标, h 大则平稳性差, h 越小则过渡过程越平稳。图 12.11 和 12.12 左边均为单调过程, $h=0$, 最为平稳。但有超调的过程快速性好, 单调过程快速性都差, h 小则 T 大, h 大则 T 小。这是一个矛盾, 应依据具体情况统筹处理。有些系统不允许出现振荡, 只能采用无超调的控制方式; 有些系统必须以最短的时间完成过渡, 采用单调变化的控制过程可能坐失良机, 要敢于“矫枉过正”, 但必须把“过正”(超调量)限制在许可范围内。

3) 振荡次数 超调量不能全面反映过渡过程的平稳性, 还要考虑该过程的振荡次数, 即在 $0-T$ 的时间间隔内 $y(t)$ 的振荡次数。如图 12.11 中右边的系统振荡次数为 1, 图 12.12 右边的系统振荡次数为 2。振荡次数小的系统平稳性好, 一般情形均希望系统的振荡次数尽量小。但有振荡的过渡过程与单调过程相比也有好处, 如快速性好。快速性与平稳性是一对矛盾, 需依据具体情况辩证地处理。

(4) 结构特性

现代控制理论发现, 除上述用定量品质指标表征的性能外, 控制系统的结构特性也很重要。8.5 节提到的能控性与能观测性是最重要的结构特性。另一个是鲁棒性 (Robustness), 或通俗地称为强壮性, 即经得起棒打, 在社会系统就是经得起风雨。现代化

的生产和科技发展常常要求控制系统在恶劣多变的环境下工作，不仅要求系统有优良的功能特性，而且要求系统能在恶劣多变的环境中正常运行，具有好的鲁棒性。

最优控制常使用一些复杂的性能指标，在数学上要用积分来表示，称为积分指标。

12.6 随机控制

前面讨论的都是确定性系统，用确定性动力学方程描述，输入、输出、状态等变量都可精确测定，即使有些状态量无法直接测得，也可通过设计状态观察器足够精确地得到它们。许多实际系统很难满足这些条件，存在不可忽略的随机因素，包括内部随机参数、外部随机干扰和观测噪声等。飞机和导弹在飞行中遇到的阵风，各种电子装置中的噪声，生产过程中的种种随机波动等，这些随机因素是系统设计和使用中必须考虑的。随机因素使系统行为具有统计规律性，必须根据这种统计特性设计控制方案。由此提出随机控制问题。把随机过程理论与最优控制理论结合起来，形成了随机控制理论。

随机因素的作用是使那些为我们提供可用信息的测量呈现不确定性，无法得到精确数据。假定 P 是待测参数，由于随机干扰得到的信号不是真实的 P 而是被污染了的信号 Q ，如前所说，为获得状态信息需要测量输出 Y ，但随机干扰使实际测量得到的是 Y 与噪声信号混杂在一起的信号 Z 。为实施有效的控制，首先要解决从被污染的量测信号 Q 中获取真实信号 P 的问题，或者是从混杂有噪声信号的实测信号 Z 中检测出输出信号 Y 来。这就是 6.4 节所说的估计问题。

维纳在创立控制学时已深入研究了过滤波问题，提出著名的维纳滤波。设 $X(t)$ 为真实输入信号， $V(t)$ 为噪声。假定所研究的

是单输入、单输出、定常线性系统，待估计的信号 $\hat{X}(t)$ 和噪声 $V(t)$ ，二者均为平稳随机过程， X 与 V 统计无关。取均方差 R^* 为最优滤波的性能指标。

$$R^* = \min E\{[\hat{X}(t) - X(t)]^2\} \quad (12.17)$$

令 F_w 记维纳滤波器， $Z(t)$ 记滤波器输入， $\Delta X(t)$ 为滤波器实际输出 $\hat{X}(t)$ 与预期输出 $X(t)$ 之差，即

$$\Delta X(t) = \hat{X}(t) - X(t) \quad (12.18)$$

则维纳滤波的方框图表示为

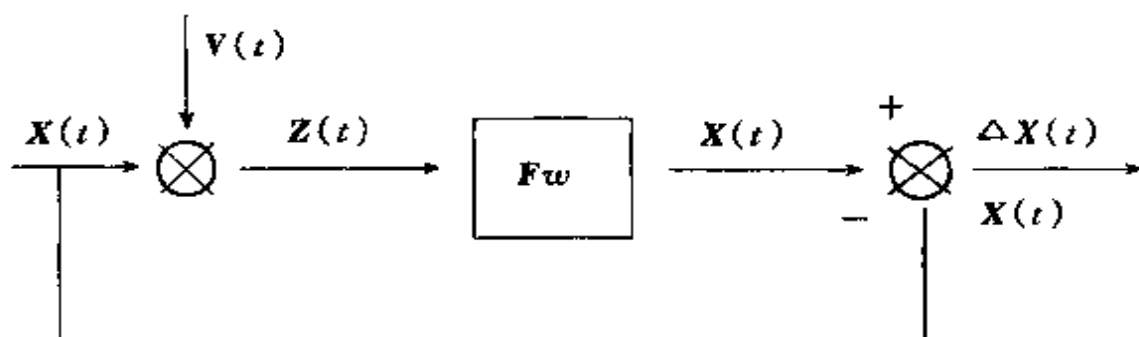


图 12.13

研究维纳滤波器是为了求得最优滤波器的传递函数 $F_w(S)$ ，为设计最优滤波器提供依据。只要知道信号 $X(t)$ 和 $V(t)$ 的频谱密度，即可求得 $F_w(S)$ 。

维纳滤波基于传递函数概念（使用频率域语言），且限于平稳随机过程，有很大局限性。卡尔曼滤波突破这些限制，使用物理意义比较直观的时间域语言，对观测数据的要求低，计算方法简单，对连续系统和离散系统都可应用，比维纳滤波功能强、适用范围大，是现代控制理论的重要成果。但卡尔曼滤波只能用于线性随机系统，且噪声服从高斯分布，当实际系统的非线性特性较强或噪声特性偏离高斯分布比较大时，这种方法不能给出符合实际的成果。

谨慎和试探是随机控制策略的两个重要原则。由于存在不确

定性，控制作用宁可取得弱一些，称为谨慎控制。为更好地进行估计，需要加入一些试探作用，以便不断激发系统的各种运动模式。试探作用的大小应根据增加的误差、直接费用、所带来的效益等因素加以权衡选择。

随机控制系统有广泛的应用，如工业过程控制，经济过程控制，航空、航天、航海的控制，军火力控制，生物医学，等等。

12.7 自组织控制

控制是典型的他组织。但在控制系统的设计中适当采用一些自组织原理，能获得更精致、更多样、更有效的控制手段。与人工控制相比，自动控制系统已经具备一定的自我组织能力。如果进一步运用自组织原理赋予系统某些特定的自组织能力，如自镇定、自维修、自适应、自学习等，可以造出各种有特定自我管理能力的控制系统。

自镇定控制 在 12.3 节所述用自动装置实行的镇定控制中，欲保持的稳定态是唯一的、预先设定的。真实系统很难满足这种要求。阿希贝仿造生物的体内平衡功能设计了一种控制装置，具有多种工作状态，一些是稳定的，一些是不稳定的，系统能在“后天的”探索中通过“理解”而自动摆脱不稳定工作状态，自动搜索新的稳定工作状态，称为稳态机或内平衡器。其工作原理是：在系统中引入一组开关装置，以切换方式来改变系统参数，每一组参数对应于系统的一种工作状态；再规定一些边界条件，当系统工作状态运动到边界条件时，开关被随机地打开，把参数随机地切换到另一组值，以改变系统的工作状态。通过这种反复的试探，系统逐步识别各个状态是否稳定，抛弃不稳定状态，最后找到稳定的工作状态。图 12.14 是一个 2 阶系统自寻稳定点的相图， ξ 是控制参数。从不稳定态 a_0 开始，此时 $\xi = \xi_0$ ，系统进行第一次

探索，到达不稳定态 a_1 时触发边界开关，参数切换为 ξ_1 ，进行第二次探索；到不稳定态 a_2 时又触发边界开关，参数切换为 ξ_2 ，进行新的探索；到不稳定态 a_3 时再次触发边界开关，参数切换为 ξ_3 ，进行新的探索；运行到不稳定态 a_4 时重新触发开关，参数切换到 ξ_4 ，再作新的探索，终于找到稳定工作状态 a_5 。

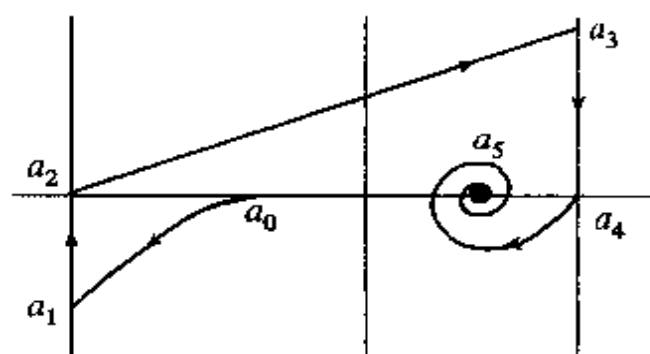


图 12.14

自寻最优点控制 能自动搜寻输出响应的最优点并使输出保持在最优点附近的自动控制方式。在数学上，这意味着输出响应函数至少存在一个极值点，代表系统的最优工作状态，因而又称为自寻极值控制。为实现这种功能目标，系统必须实时地检测本身的工作状态，不断地判断系统是否处于当时可能达到的最优状态，并根据检测和判断所得信息作出使系统趋达最优状态所需要的调整。

自适应控制 在控制学中，适应意味着系统能在变化的环境中坚持成功的行为。适应性问题总是相对于一定的环境 E 提出来的，并以一定的性能指标 P 为依据来衡量。以 C 记性能指标鉴定器，自适应控制如图 12.15 所示。

对环境不敏感的系统必定是适应能力强的系统。人由于易地而引起的高山反应、时差效应，对异国他乡风俗民情的不习惯，都属于不适应。从内部看，适应性要求系统有高超的自我调控能力，

能够监测环境和系统自身的变化，对有关信息进行处理，通过对内部组分的耦合方式和结构参数的调整，重新组织自己以适应变化了的环境。自适应是一种探索过程，一种学习过程，通过探索和学习以求得适应。

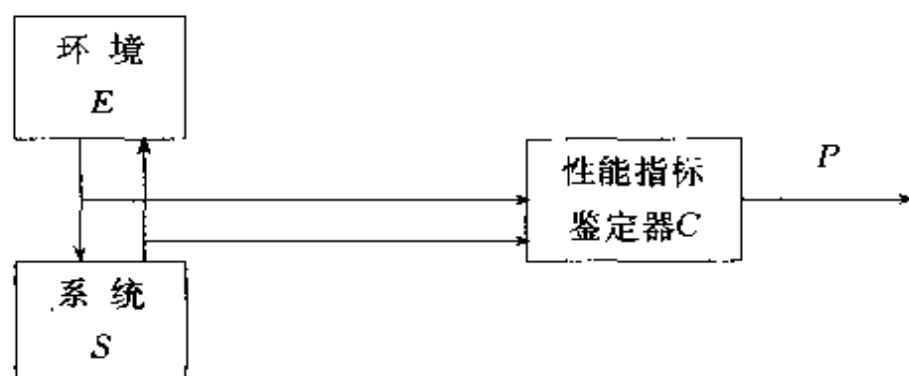


图 12.15

自修复控制 系统在工作运行中出现故障或局部损坏是常见的现象。系统要保存自己并正常运行，需要有能够排除故障，使受损伤部分复原。在控制学中引入自组织原理，采取适当的设计方案使系统具有一定的自我修复能力，叫做自修复控制系统。一般来说，不可能也不必要要求被损坏的部分完全恢复如初，只须要求受损坏部分的效能被逐步屏蔽起来，以至经过一段时间后，系统性能比受伤时有所提高，可以令人满意地发挥其功能，就认为系统已经修复。设 $P=P(t)$ 为性能指标，系统在 $t=0$ 时受损伤，性能指标降低至 $P=P(0^+)$ 。经过从 0 到 T 的时间间隔的系统自组织运动，性能指标有所提高，达到

$$P(T) > P(0^+) \quad (12.19)$$

就认为系统在时间间隔 $[0, T]$ 内经过了自修复。这是对自修复的最低要求。一般情形下，要求系统经过一段时间的自组织，性能指标 P 能提高到一个令人满意的水平。以 P^* 记令人满意值的下限，自修复可以精确地定义为：设 $t=0$ 时系统受到损伤，如果经过时间间隔 $[0, T]$ ，性能指标满足

$$P(T) \geq P^* > P(0^+) \quad (12.20)$$

则称系统在时间间隔 $[0, T]$ 内实现了自修复。

12.8 大系统控制

现代社会日益信息化,人类的实践活动日益大型化、复杂化,使工程技术、经济活动以及其他社会领域出现了越来越多的规模很大的系统:大型工业企业、大电力网、交通网、能源系统、航天系统等工程技术大系统,城市管理系统、国家行政系统、教育网、医疗网等社会大系统,以及生态环境大系统、人口大系统等。如何管理控制这些大系统,成为现代控制理论的重大课题。一种意见认为,70年代以来控制学进入第三个发展阶段,即大系统控制学阶段。

由于构成元素或子系统的数目庞大,结构关系复杂,牵涉因素众多(多输入、多输出、多目标、多参数、多干扰等),使大系统具有许多不同于中小系统的特点。一是分散性,大系统常常由许多联系松散的小系统组成,导致信息分散,控制分散,如电力网分散地分布在很大的地区中。二是不确定性,大系统的随机因素比小系统更加复杂多样,大系统有明显的模糊性,许多情况无法确知。三是系统规模大了,数学模型都是高维、高阶的,出现所谓“维数灾”,精确分析和设计都很困难。四是大系统中一般包括人的因素,人有思想、感情、智慧,有能动性,常采取主动的策略行动,大大增加了系统管理控制的复杂性和不确定性。控制学是以处理中小系统为主要背景发展起来的,不能满足大系统控制的需要。

信息的采集处理对于大系统控制具有十分重要的意义。一个大系统通常应有能力连续地收集、传送、处理大批量、多来源的各种数据。系统越大,数据的来源越多,种类越多,数量越大。社

会系统尤其突出。要有现代化的通信网络和计算网络，才能实现社会大系统的信息收集、汇总、辨识、分类、存储、传送、提取等作业，为管理控制创造必要的前提。例如，没有现代计算机，就无法制定控制人口增长的有效措施。

中小系统通常采用集中控制的方式，只有一个控制中心。系统的有关信息都汇集于该中心，在那里进行集中处理，作出统一的控制指令，去控制系统各部分的运行。乍看起来，采用这种方式控制大系统也是可行的，甚至可能是理想的模式。实际情形不是这样。在由单一中心集中控制的大系统中，由于信道容量有限，信息无法全面及时地送入控制中心，造成信息的严重滞后和损失。由于信息处理能力有限，送入控制中心的大量信息得不到及时准确的处理，难以形成正确的控制指令。信道容量的限制也使控制指令不能及时正确地传送到各部分，无法实施有效的控制。这样的大系统结构高度刚性，行动迟缓，控制失灵，缺乏应变能力，无法适应多变的环境，容易僵化，在激烈的竞争环境中处于被动地位，甚至被淘汰。

大系统必须分散控制权力，设置多个控制中心。控制中心多元化产生了不同控制中心之间如何协调配合的问题，以便组织成为一个秩序井然的系统。这要视大系统自身的特点来定。最简单的是完全分散的控制，即多个控制中心对大系统分片包干，各管一摊，彼此之间靠系统内部各组分的动态相互作用来调节（即前面说过的初级调节），不另设控制机构对它们进行干预。典型例子是城市的交通控制。当大系统各组分之间联系松散、控制要求简单、只需在某些点上加以控制时，即可采用这种方式。

在自然界演化中发展起来的生命机体，历史地发展起来的社会组织，都不是高度集中的刚性结构，也不是完全分散的控制方式，而是按等级层次方式组织起来的。在社会系统中，由于所属单位非常多，这些基层单位的任务、产品、组织结构千差万别，它

们所提供的资料各不相同，只能划分成多个等级，分层进行管理。上一层次只对相邻下一层次进行管理，一般不能越级干预更下层次的活动。离基层单位最近的上级层次直接管理基层单位，再上一层次负责协调这一层次各部门、地区的相互关系，逐级分权管理，直到最高一级负责制定总任务、总目标，并监督执行。凡在下一层可以处理的信息，都不送入上一层，下层不能处理的、涉及更大范围的信息，必须送入上一层去处理，涉及整个大系统的信息，要送给最高层处理。按等级层次方式组织起来的大系统，具有合理的信息流通渠道和有效的信息处理能力。如有上亿千瓦的发电能力的大电力网络，年传输一万亿千瓦/小时电的输电网络，为保持可靠稳定运行，必须用分散与集中相结合的控制方式，才能完成状态监视、负荷调度、自动保护、事故处理、计价收费等管理职能。国家的社会行政管理亦如此。

与等级层次结构相适应的控制方式，是按集中与分散相结合的原则建立的递阶控制。其中又包括三种不同方式：

(1) 多级递阶控制

按受控对象或过程的结构特性把大系统划分为许多小系统，按决策控制权力划分为许多等级，同一级的不同控制中心彼此独立地控制大系统的一部分，下一级的控制中心接受上一级控制中心的控制指令。控制过程中信息流通主要是上下级之间的纵向传递。图 12.16 例示一个三级递阶控制的大系统。

(2) 多层递阶控制

按控制任务或功能把大系统划分为多个层次，较高层次的任务或功能较为复杂概括，较低层次的任务或功能较为简单具体。较高层次需要对付的是不经常发生的或缓慢变化的扰动，较低层次需要对付的是经常性的或变化快的扰动。不同层次之间既有分工合作的关系，又有上层领导下层的关系，既有从高层向低层的指令信息传递，又有从对象及低层向高层的信息传递和反馈。例如，

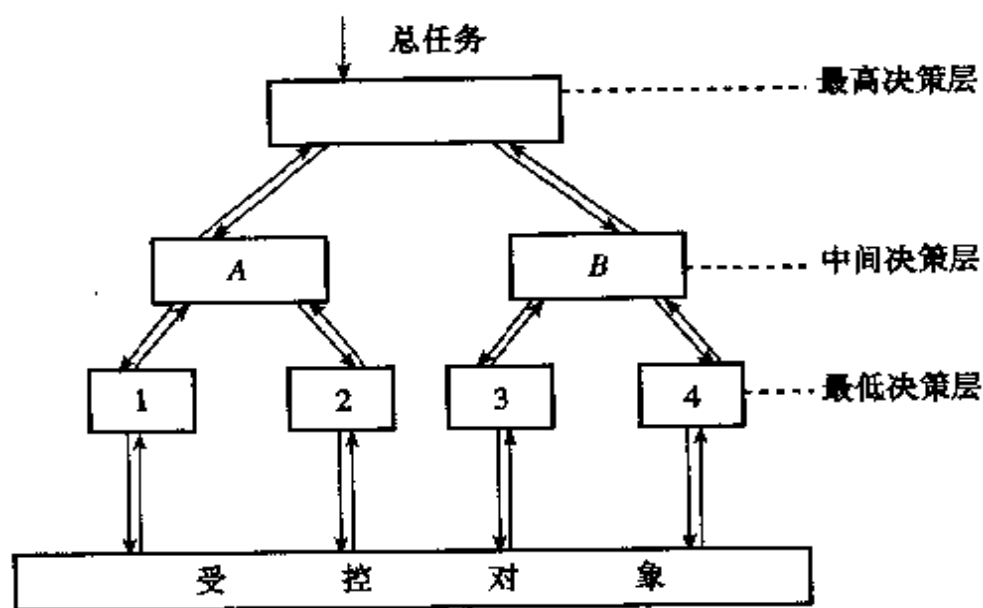


图 12.16

工厂的生产系统可划分为两个层次来控制，厂一级控制月生产目标，要对付的是较长期的市场变化；车间一级控制日生产率，要对付的是短期扰动。图 12.17 示意的是一个两层递阶控制系统。

(3) 多段递阶控制

按受控制过程的时间顺序把过程划分为若干阶段，每一阶段构成一个小系统控制问题，再按各段之间的衔接条件进行协调控制。图 12.18 示意的是一个三时段递阶控制的系统。如导弹飞行过程通常划分为主动段、惯性飞行段和末制导段，三个阶段分别有自己的控制系统，三个阶段之间又有协调控制。

等级递阶控制系统中信息活动主要在上下层次之间进行，同一层次的不同部分之间的横向信息交流不在考虑之列，事实上一般情形也很微弱，有时甚至限制横向的信息活动，这种系统容易僵化。高度集中的计划经济的蔽病就在于此。它严重扼杀了系统的自组织能力，因为自组织的特点是成员之间有发达的横向信息交流。等级递阶控制是他组织系统的控制方式。社会是特别复杂的巨系统，是他组织与自组织的适当结合，既要有各个层次上发

达的自组织，又要有必要的、有时甚至是强有力的等级递阶控制。

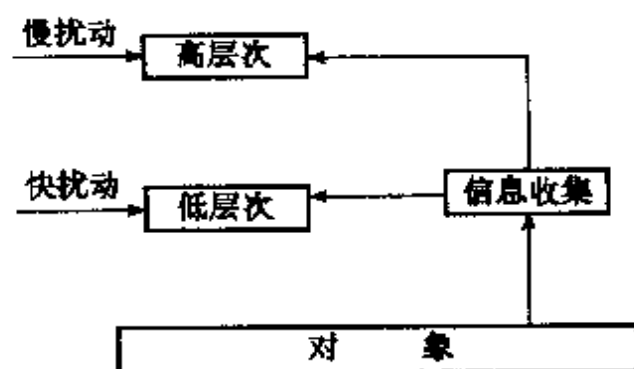


图 12.17

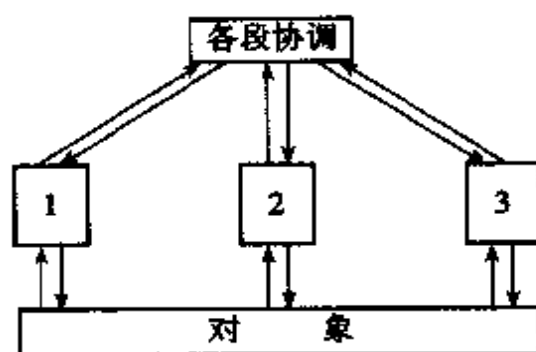


图 12.18

12.9 控制 技 术

可以把控制分为人工控制和自动控制两类。人工控制也需要技术，多半是软技术。这里讲的主要是自动控制技术，有时称为自动化技术。

把控制学的原理应用于工程实践和经营管理实践所形成的技术，就是控制技术。其中，所谓自动技术是有关把人从直接进行检测、操纵、控制、调节、管理等劳作中解脱出来所需要的各种自动装置及其设计和使用的方法、技能的总称，包括硬技术和软技术。目前有关控制工程和控制技术的著作与有关控制理论的著作往往难以区分，造成某些混乱。遵照钱学森关于工程技术和技术科学划分的原则，我们把有关控制系统建立数学模型、求解模型、分析模型、综合设计等一整套方法技术，如传递函数方法、频率特性方法、状态空间方法等，归入控制学；把有关具体实现控制原理的方法技术，如结构方案、线路选择、元器件设计等技术，归于控制技术。

自动控制元件技术 自动控制系统中按结构和功能划分出来的最小独立部分，称为系统的元件。系统是由元件组成的，系统

的整体功能建立在元件功能之上。元件技术是控制技术的重要组成部分。敏感元件、中间转换元件、执行元件以及其他用于控制系统的元件，都有特殊的设计使用技术。

自动控制系统技术 设计和使用控制系统整体所需要的技术，称为控制系统技术。每一种控制方式都对应着一定的系统技术，如程序控制技术、随动控制技术、补偿控制技术、反馈控制技术、最优控制技术、随机控制技术等等。每发现一种控制原理，都需要创造一套技术使它实现。

随着社会信息化的发展，信息技术和控制技术很难截然区分开来，核心都是计算机技术。

思 考 题

1. 举例说明定值控制、程序控制、随动控制和最优控制的特点。
2. 说明反馈控制的机理、优点和缺点。您的实际生活中是否有反馈？
3. 试举出商战、政治斗争和外交斗争中应用黑箱方法的若干实例。您在生活和工作中是否应用过黑箱方法？
4. 阐述控制过程中准确性、快速性和平稳性的关系。
5. 试评述命题“控制就是反熵”。

阅 读 书 目

1. 苗东升：《系统科学原理》，第4、6、8章。
2. 苗东升：《系统科学辩证法》，第3章。
3. 维纳：《控制论》，2版，导言，第1、3、4、8章，北京，科学出版社，1961。

4. A. Я. 列尔涅尔:《控制论基础》,第 1、3、6、7、8 章,北京,科学出版社,1981。

5. 钱学森、宋健:《工程控制论》,修订版,序,北京,北京科学出版社,1983。

第13章 事理学

1978年，许国志首次提出“事理”概念，发表《论事理》一文，对这个新概念作了经典性阐述。钱学森迅即表示赞同，给以自己的解释，并提出建立理论事理学的倡议。不久，许国志又在《从运筹学到系统工程》一文中作出进一步阐述。宋健在《领导工作科学化和自动化的参谋部》、《事理系统工程和数据库技术》等论文中也肯定了事理和事理学的概念，提出事理系统（或称事务处理系统）和事理系统工程的概念，认为事理学是事理系统工程的理论基础。1990年，苗东升在《系统科学原理》一书中依据许、钱、宋的提法，尝试对事理和事理学的含义给予系统的界定；1993年，又在《运筹学的辩证思想》一文中对有关的哲学问题作了阐述。1995年，张锡纯提出研究报告《工程事理学探索研究》（预印本，1995.6），给事理学以迄今最详尽的讨论，为进一步讨论事理问题提供了参照。他提出：“如果能把事理研究改称事理学，与运筹学分开来，独立发展，真正去研究形形色色事情的办事道理和规律，也不限于把事情办好的所谓‘优化’的道理，把优化的数学理论和算法留在运筹学，将使事理研究会有一个飞跃的发展。”（18页）他把研究报告送给钱学森，引来钱学森的那封回信（见11.1节），肯定了运筹学与事理学是系统科学在技术科学层次上的两门学科的意见，并对四门技术科学相互关联地作了界定。但事理学毕竟是新学科，我们还无法给出它的概念框架。

13.1 从物理到事理

科学是关于客观世界的知识体系。客观世界是由物和事两方面组成的。物指独立于人的意识而存在的物质客体，事指人们变革自然和变革社会的各种活动，包括人对自然物的采集、加工、改造，人与人的交往、合作、争竞，对人的活动所作的组织、协调、管理、指挥等等。通俗点讲，事就是人们做事情、搞工作、处理事务。客观世界是一切事与物的总和，事与物一样是科学研究的对象。

古代人类积累的知识，包括关于物的知识和关于事的知识，均属于前科学的知识。随着近代文明的兴起，关于物的知识首先获得科学的形态，产生了自然科学。自然科学创造了一整套方法，把人在实践中对自然界的影响撇开，单就实践的物质对象的自然属性进行研究。自然科学的基本信念可以用中国的一句格言表述为：“物含妙理总堪寻”。它包含两个基本观点：其一，存在着有关物质对象的构成、相互作用、运动变化的客观规律和一般原理，可以称为物理；其二，这种物理是人类可以认识和把握的。自然科学是关于物理的科学，即广义的物理学。

按照科学唯物主义的一般原理，人们的办事过程也是客观物质运动，同样有规律可循。一切关于人们如何办事的规律、原理、道理，可以统称为事理。一切使人成功地办事的原则、方法、经验，必定符合事理。“成事”的做法、经验中必有事理，“败事”的做法、经验中也有事理。中国人常说某人“明事理”或“不明事理”，某个说法“切合事理”或“不合事理”，就是在最一般意义上讲的事理。

但在 20 世纪之前，事或事理从未进入科学研究的视野。由于通常处理的事务都是个人的或小群体的，单凭个人经验和才能一

般均可获得令人满意的解决，尚未产生对事理进行科学研究的社会需要。又由于事理现象包含明显的人为因素和权变性，与物理现象截然不同，科学发展的水平还无法揭示出关于事理的一般规律并制定通行的解决方法，尚无建立事理学的可能性。“世事茫茫难预料”，道出人们对于无法科学地把握事理的困惑。人们甚至认为，事无常理，并没有规律可循，一切要靠运气和个人的办事艺术。

这种情形随着 20 世纪的到来起了变化。随着大工业、大生产而出现的大企业，单靠个人经验和办事艺术已无法经营管理好。这种中观层次的事理活动大量出现，产生了建立事理学的客观社会需要。

自然科学的巨大成功强烈地诱导人们产生一种信念：可以把自然科学方法移植应用于社会领域，去解决经营管理中的大量事理问题。

从 20 世纪初起，欧美一些学者在各自的背景下就某些特殊事理问题进行探讨，如 1.5 节提到的泰勒、爱尔朗、兰彻斯特等人的先驱性工作。他们研究的对象不再是物质运动本身，而是社会服务、工时定额、作战安排和人员调动等事理运动。他们的成果不仅为日后建立运筹学发现了若干典型问题，提出一些概念和方法，更重要的是使科学界获得关于事的（软的）重要性即对研究事理的必要性的认识，看到应用科学方法研究事理的可能性，标志着科学向事理领域的进军开始了。

决定性的转变是第二次世界大战促成的。对一批结构良好的事理问题的研究形成了运筹学。建立和发展运筹学的实践扩展和深化了人们对事理的认识。到 70 年代末，许国志、钱学森跳出传统运筹学的范围，概括出事理和事理学概念，标志着科学从单纯研究物理向重视研究事理的转变完成了。这是 20 世纪科学思想的重要进步之一。

13.2 事理通论

什么是“事”?《辞源》的解释是:“凡人所作所为所遭遇都叫事。社会生活的一切活动和自然界的一切现象也叫事。”前一命题是正确的,后一命题有错误。

一次地震,一场洪水,是物理运动而非事理运动。人们的救灾活动才是事理运动,如何最有效地救灾的规律是事理。

凡是人们从事的活动,包括人与人的交往、合作、争竞、人对物的使用和改造等活动,均可广义地称为事。简言之,事就是事情、事务。

正如物理学要区分物理现象和物理本质一样,事理学也要区分事理现象和事理本质。这里讲的不是与化学区分开来的物理学,而是广义的物理学,在一定程度上就是自然科学。事理现象指事理的本质在各方面的外部表现,即人们在事理活动中直观把握的一切外部形态的东西及其联系,如哪些人参与,使用什么物质材料,出现哪些波折,起止时间,事件发生的前后次序等。构成办事过程的各种事实、现象,就是事理现象。事理的本质指隐藏在这些现象背后的办成办好事情应遵循的道理、规律等。

作为建立事理学的认识论前提,首先要回答的问题是:事理运动有无客观规律?人们能否把握事理运动的规律性?把科学理性引入事理领域,必然使人们产生这样的信念:事含妙理亦堪寻。它包含两个基本观点:

第一,与物理运动有其规律性一样,事理运动也有其规律性。战争是一类重要的事理运动,伟大的古代军事家孙武把战争界定为“国之大事”,留下研究战争规律的兵法 13 篇,包含有丰富的事理学思想。

毛泽东曾经明确指出:“战争不是神物,仍是世间的一种必然

运动”^①。他的许多军事著作都标明是研究战争规律的。早期运筹学家选择的那些研究课题，表明他们相信战争和非战争的事理运动都是有规律的。运筹学的成功初步证明这种信念的正确性。一切事理运动都是世间的一种必然运动，有其客观规律性，许国志最先以一般的方式指出这一点：“事物总有其一定的规律性，物有物理，事有事理。”^②又指出：“物有常规，事有定理，这些基本规律可以称为事理”^③。

第二，一切事理都可以认识，事理规律是可以把握的。汉语有“知事”、“料事”、“料事如神”的说法，表明我们的祖先相信事理可知。孙武自信他可以在战争之前“知胜负”。早期的运筹学家努力把自然科学方法引入作战指挥和经营管理中，现代系统科学家提出建立事理学，表明他们都坚持“事理可知论”。现代科学唯物主义为我们相信事理可知提供了坚实的哲学基础。

与物理运动不同，事理运动包含能动性，是客观必然性与主观能动性的统一。能动性的一个表现是目的性。人总是抱着一定功利目的去办事的。恰当地确定目的、目标，是把事情办成办好的重要环节。凡事要由人来做，做事就要有计划、方法、策略等，计划性是事理运动能动性的另一表现。物理运动独立于人的主观因素，不会因人而异。不同人做同一件事不仅方式方法不同，目标设定也常常不同，主观能动性的发挥不同，最后效果也不同。能动性还表现在办事的灵活性上。毛泽东关于“能动性在战争中”的著名论述（见《论持久战》等），对于一般的事理问题也适用。

事理运动较物理运动有更多的不确定性。偶然性，随机性，模糊性，含混性，灰色性，权变性，这些类型的不确定性都会在事

① 《毛泽东选集》，2版，第2卷，458页，北京，人民出版社，1995。

② 许国志：《论事理》，载《系统工程论文集》，12页，北京，科学出版社，1981。

③ 许国志：《从运筹学到系统工程》，载《科学家谈系统工程》，北京，科学普及出版社，1981。

理运动中发现。办事一般没有确定的程式，可重复性差，有些事几乎是不可重复的，即俗话所谓“世事如棋局局新”。

应当重视处理事理问题的有限性原理。一是条件的有限性，可利用的物资的有限，空间的有限，时间的有限，等等。人只能在给定的有限条件下去争取把事情办成办好。“事在人为”被有些人误解为做事成败全在主观努力，没有客观规律可循，只要“心想”就会“事成”，这是一种反科学的观点。二是西蒙等人强调的理性的有限性，办事者获得信息、处理信息和利用信息的能力都有限。经典系统理论实际上建立在无限理性的假设上，与客观实际不符合。这种有限性是事理客观性的另一种表现。

张锡纯对“事理系统”概念提出质疑，不赞同“任何事情都是一种系统”的提法；但又认为他提倡的工程事理学“面对的活动总是系统的活动”，等于承认事理是系统。任何事情都是作为一定的系统而展开的。不论什么事，不论其或细或巨，都要涉及不同的人或物或信息，包含不同的操作或活动，经历不同的时段，这些不同要素按一定方式耦合在一起，就构成一个系统，称为事理系统。事理活动的主体或承载者必是社会系统，社会系统是通过一系列事理活动表示其存在的。但事理系统与社会系统并非一回事。北京航空航天大学是一个社会系统，却不是事理系统。也不能把事理系统界定为有目的的社会系统，因为一切社会系统都是有目的系统。“北航”作为系统的目的是培养航空航天人才，发展航空航天科技。“北航”组织的一个科技系列报告，或举办一次运动会，则构成一个事理系统。也只有把办事情当作系统，才能应用系统方法认识和处理。系统科学研究的是系统问题。承认事理学是系统科学的一个分支，包含承认事理系统的概念。

事（或事理现象）的分类是一个重要问题。中国文化中有政事、军事、商事、农事等划分，文事、武事或家事、国事、天下事的划分。但这不是事理学的分类。事理学只研究这些特殊事理

现象的共性问题。另一种划分，如小事与大事、细事与巨事等，则属于事理学的分类。因为把事理问题看作系统，就可以按照其规模划分为小系统、大系统、巨系统。成事和败事也可看作事理学的分类。下节提到的结构良好的事与结构不良的事是一种有重要科学意义的分类。事的更一般的分类应揭示不同类事理现象的特殊矛盾，发现事理领域的普适类，这是一个尚待研究的困难问题。

事理的分类也需要认真研究。存在两类事理。一类是定量事理，或可以量化的事理。运输问题是线性规划研究的重要问题，运筹学家通过研究对偶定理发现，运输能创造的价值不应大于最优方案能付出的运费。这也是一条客观规律，是一条事理。这条事理告诉我们，在理性行为指导下，运输部门不能漫天要价。但这属于定量事理。另一类是定性事理，不能或难以量化的事理。“万事起头难”，“欲速则不达”，都属于这种事理，它们属于事理学研究的对象。张锡纯提出事理与源事理的划分，把源事理定义为“主宰着人类、生物界的过去、今天和未来发展的根本性事理”（23页）。但源事理是否属于事理学的研究范围，尚须讨论。历史学、法学、政治学等社会科学揭示的社会系统运行的基本规律，似应属于源事理。

许国志等不久前提出：“人类某些活动的理性行为就是‘事理’。”^①事理必定与人的活动联系在一起，符合事理的办事活动必定是理性行为，要从人类的理性行为中发现事理。但事理与行为不是一码事，不能把事理定义为某类行为；限定“人类的某些活动”，意味着另一些人类活动不包含事理，这也有待探讨。天行有律，事运循规。系统科学家有理由相信存在和物理学的热力学第二定律一样的事理学定律。但这个目标不是一朝一夕能够实现的。

^① 许国志主编：《系统研究——祝贺钱学森同志85寿展论文集》，94页，杭州，浙江教育出版社，1996。

“终应玩味高寒意，且把层峦拾级攀。”（同上）目前应从较低层次上工作，寻找一些更具体的事理规律。

13.3 事理学与运筹学的划分

运筹学的研究对象也是事理系统，本为事理学的一个分支。在尚未区分事理学和运筹学的 80 年代初，宋健曾给出如下定义：“事理学是指定量地研究特定的社会现象、社会事务和社会过程的理论”，事理系统工程是“处理或管理社会事务的系统工程，包括政治、军事或经济范畴内的特定事务管理，社会服务性的事务管理等”^①。前一个定义值得商榷，社会科学都在向定量化方向发展，定量化地研究特定社会现象的学科一般属于社会科学。按张锡纯和钱学森的新提法，事理学应讨论的是事理问题中除去运筹学研究对象的那部分问题。

运筹学家早就注意到有两类运筹问题，更准确地说应是两类事理问题。一类是“结构良好的”事理问题，可以用明确的数学模型描述，作出定量的刻划。这就是运筹学的研究对象。另一类是“结构不良的”事理问题，即无法建立明确的数学模型、给以精确的定量分析的事理。这是事理学的研究对象。几十年来把现有运筹学方法推广于后一类问题的努力均未获成功，迫使许多学者提倡建立“软运筹”、“软系统工程”等，其实就是事理学。钱学森 70 年代末把运筹学界定为给系统工程提供理论依据的定量化数学理论，仍然有效。事理学只能提供半定量的或定性定量结合的理论和方法。西方学者多年来在“软运筹”、“软方法”等方面的研究成果，都可以统一划归事理学。

^① 宋健：《事理系统工程和数据库技术》，载《科学家谈系统工程》，北京，科学普及出版社，1981。

事理学与运筹学都是提供系统优化运行的理论和方法的学科。需要区别优化与最优化两个概念。最优化是一个精确概念，追求的是唯一的极值，只对于结构良好的事理问题有效，运筹学是关于最优化的理论和方法。优化则是一个程度型的问题，追求的是更优些或尽量优化，结构不良的事理问题很难找到最佳值，提最优化一般没有意义。事理学是关于优化的理论和方法，不是关于最优化的理论和方法。

事理系统都讲究效益。效益大体可以分为及时的与长期的两种。相对来说，及时效益比较确定，易于精确描述，是运筹学所追求的。长期效益一般不确定性大，难于精确描述，是事理学所追求的。但短期与长期是相对的，太长的事理运动也难以作为一件事去处理。从广延性看，张锡纯关于事理学的“研究范围应偏于中观和宏观”（50页）的提法有道理，主要限制于中观事理现象或许更恰当些。

从处理对象看，运筹学研究的是简单系统、大系统，事理学处理的是复杂系统，甚至是复杂巨系统。事理学是处理复杂巨系统的技术科学，系统学是它的理论基础。试图以运筹学方法处理开放的复杂巨系统问题，是注定不能成功的。理论事理学的提法已无必要，事理学是技术科学，它的理论基础也是系统学。

如何区分事理学与社会科学，也是尚待探讨的问题。解决事理问题无疑要应用社会科学，如办事总会牵涉法律、法规，但研究法律、法规不应是事理学的内容，而是法律学的内容。国家兴衰虽然包含事理，但属于政治学和历史学的研究对象，不是事理学的研究对象。例如，鸦片战争以来中国社会历史的风云际会是历史学的重要课题，不能用事理学原理分析。经济活动中包含事理活动，但不限于事理活动。撇开其中的事理活动去考察纯粹的经济运动，才是经济学的本意。办好一件事情一般都要考虑经济性，但其中的经济规律不属于事理学的研究对象。这些界限需要

进一步划分清楚。管理活动是一种典型的事理活动。但事理学不等于管理学，二者的划分还有待研究。

张锡纯提出事理学的分支问题，是建立和发展这一学科必须考虑的。除工程事理学外，他明确把运筹学作为并列的另一门事理学。“历史上有殷鉴，《资治通鉴》，它们反映的是兴亡事理；运筹学所研究的是优化事理；军事学研究的是胜败事理”。(19 页)把运筹学作为事理学的分支本来是有道理的，但既然把它独立作为一门系统技术科学，就不可再作为事理学的分支。把运筹学与工程事理学并列也不妥。工程事理学可简称为工事学，与它并列的是农事学、军事学、商事学或许还有文事学等等，它们不应划归系统科学，而是系统科学与其他科学的交叉，如工程事理学是工程科学与事理学的交叉。运筹学完全撇开工事、农事、商事等的特殊性，只从运筹优化的角度看问题，是标准的系统科学分支。事理学研究的是政事、军事、工事、农事、商事、文事中的共性问题，即办各种事的共同规律和原理。至于历史学，虽以天下兴亡大事为研究对象，但属于社会科学，不是直接研究办事规律的，归于事理学太勉强。

应从事理的观点考虑事理学的分支问题，如分为事理预测学、事理决策学、事理模拟学、事理评鉴学等或许更恰当些。运筹学是按运筹问题的普适类确定分支的，也应按事理现象的普适类来划分事理学，但这是将来才能解决的任务。

80 年代初，许国志在《论事理》一文中指出：“在物理学中能量是贯穿整个学科的主要概念。但目前在事理中还缺乏这种起着贯穿全局的概念。这有待于将来。”^①系统科学的发展越来越表明，“信息”应是这种起着贯穿事理学全局的概念。但事理学要像物理学描述能量那样描述信息，尚有待于全信息理论的建立和发展。

^① 载《系统工程文集》，12 页，北京，科学出版社，1981。

13.4 事理学方法论

钱学森等认为：“‘事理’同数学、物理都充满了辩证法的道理，都是以辩证唯物主义作指导的。”^①著名运筹学家丘奇曼在谈到运筹学和系统分析的未来发展时也指出：“需要有改进系统的辩证方法”，“未来系统方法的主旨概念将是辩证的学习过程”^②。事理研究的方法论以辩证法为其哲学基础，这是不容置疑的。

在科学方法论层面上，作为系统科学的一个分支，事理学同运筹学一样是基于系统观点和方法处理问题的。但事理学在方法论上应有其特殊性。80年代前期，钱学森在发展军事系统工程、社会系统工程，探讨“建立一类建设和管理国家的科学”^③，以及与王寿云合作研究作战模拟问题的过程中，形成一套颇具特色的方法论思想。王寿云把它称为复杂行为系统的定量方法学，在《论系统工程》的“增订版说明”中作了高度的概括。按我们的理解，这就是事理学的方法论。它的要点如下：

（一）关于复杂行为系统的定量化描述存在三种方法。

（1）严格理论的定量途径：从基本科学原理出发，建立复杂行为系统的数学理论，据之构造系统的模型，进行“最彻底的计算”（钱学森语），作出精确的定量结论。这是严格按照自然科学和数学原理处理问题的定量化途径。典型代表是诺伊曼的博弈论，运筹学的规划论、排队论等均属于这种方法论。

（2）半经验的定量途径：从经验性假设出发，建立复杂行为系统的数学理论，依据这种半经验的理论建立系统模型，从中引

① 钱学森等：《论系统工程》，增订本，18页。

② 小拉尔夫·弗·迈尔斯主编：《系统思想》，350页，成都，四川人民出版社，1986。

③ 钱学森等：《论系统工程》，增订本，483页。

出定量的结论。典型的工作是兰彻斯特关于作战过程的数学描述。

(3) 经验的定量途径：不着眼于建立数学理论，主张通过“完全将经验的数据纳入计算机”（钱学森语），对复杂行为系统进行模拟计算，作出定量的结论。一项典型的工作是当代美国军事运筹学家杜派等人依据经验，把影响战斗结果的各种因素定量化，建立了模拟作战过程的定量判定模型。

(二) 上述第一种定量化途径在理论上有很大魅力，可以用来解决某些比较简单的问题。例如，以博弈论为指导，解决了关于计算机下棋和简单的军事战斗集体（如排对排）的行动模拟问题。但对复杂行为系统，如结构复杂、成员众多的集团对阵问题，从微观经济到宏观经济的过渡问题，等等，至少目前还没有严格的科学原理可以遵循，也难以提出近似符合实际的理论假设。一些已建立起来的模型，尽管理论性很强，其实不免牵强附会，脱离实际。与其如此，倒不如从建模一开始就老老实实承认理论的不足，而求助于经验判断，让定性的方法与定量的方法结合起来，最后定量。各种已获成功应用的方法都是在经验性理论上建立的。

(三) 处理复杂行为系统的定量方法学是半经验半理论的。所谓半经验理论，是在难以用严格数学方法处理的问题上，根据深入实际的经验性观察提出一组假设（猜想或判断），用以说明影响复杂行为系统的主要变量是如何结合起来对实际过程产生影响的。然后，选择适当数学形式把这些变量或参量的相互关系表示出来，得到系统的数学模型。由于是借助数学模型表示实际问题，通过研究模型得到关于复杂行为系统的定量化原理和结论，故属于理论方法；由于这种数学理论是以经验性假设为前提建立的，具有经验的实质，故称为半经验的。

(四) 要恰当地提出经验性假设（猜想或判断），必须详尽地掌握复杂行为系统的有关资料数据。例如，作战模拟必须占有相

关的历史数据、演习数据和靶场实验数据。关键是善于从这些数据资料中提炼出经验性假设。经验性假设中包含猜想的成分和简化的因素。同一种复杂行为系统，同样的数据资料，可能提出不同的经验性假设，建立不同的数学模型。这是事理学与物理学、工程技术等在定量化描述方面的重要区别。复杂行为系统的定量方法学，是科学理论、实践经验和专家判断力的结合，它所提供的建模方法不是取代专家的思维和判断，而是对专家判断力的补充。

（五）与科学理论的假设不同，经验性假设不能用严谨的科学方式核实验证，但必须符合实际经验事实，因而必须用经验性数据对其确实性进行检测。另一个不同点是，从经验性假设出发应用定量方法学获得的结论，仍具有半经验半理论的性质，需要经过实践经验和数据的检验。

（六）对于前人创造的经实际经验证明行之有效的方法，人们往往容易为其漂亮的形式和严密的逻辑性所吸引，而忽视数学模型微妙的经验含义或经验性解释。如作战模拟中对兰彻斯特方程的应用就有这种倾向。复杂行为系统的定量方法学要求克服这种倾向，强调要了解这种数学理论的经验含义，并根据具体应用作出必要的补充和修正。

复杂行为系统的定量方法学是一种新的建模理论，包含方法论思想的深刻变化。在系统工程和运筹学后来的发展中，以及系统动力学、软系统方法、模糊系统理论、灰色系统理论中，都提出把科学理论与实际经验、定性方法与定量方法结合起来的观点。钱学森注意到系统科学的这种新动向，并给予系统的总结提炼。在科学发展中，人们总是希望从经验性理论过渡到严格的科学理论。但必须明白，任何时代都有大量问题不能用严格的理论方法处理，经验的或半经验的方法是不可缺少的。

还应指出的是，办事艺术始终是办成办好事情的重要因素。在强调把现代科学规范和数学方法引入事理学的同时，防止过分强

调精确化、定量化，不可企图把事理学建设成一门类似物理学那样的精确科学，主张把科学、经验和艺术结合起来，乃是事理学的一条方法论原则。

13.5 事理运筹

事理系统可以一般地表示为

$$S = \{ \text{目标, 条件, 运筹, 实行} \} \quad (13.1)$$

在给定的条件下为达到目标而进行谋划决策，就是运筹。办事 = 运筹决策 + 实行，具有决定意义的是运筹。

在汉语中，“运筹”一词指的是办事人运用谋略、智慧进行策划，即汉高祖刘邦所说的“运筹于帏幄之中，决胜于千里之外”，亦即孙武说的“庙算”。中国人爱讲“谋事”。凡事都是人“谋”出来的，未谋而办的事，除非十分简单并巧得机遇，是不可能办成办好的。所谓“凡事预则立，不预则废”，说的就是这个意思。事理运筹就是筹谋策划，第一位的是定性的谋略，其次才是定量的计算。按照前面界定的运筹学，一般并不需要这样的筹谋策划，关键是运用数学智慧，核心环节是建立数学模型，主要工作是数量的分析计算。这是熊十力所说的“量智”。因此，称为运筹学并不准确，原来的命名“运用学”似乎更适当些，或者称为筹算学。事理学更需要运筹，需要谋略，即熊十力所讲的“性智”。收回香港是一件大事，办成这件事的关键是以提出“一国两制”构想为核心的一整套运筹决策。这是事理运筹的典型例子，起决定性作用的是“性智”。

俗话说，“谋事在人，成事在天”。谋事就是运筹。谋事不限于在任务确定后对如何办事的策略方案进行分析选择，许多事（任务）是经过筹谋策划才提出来的。在总的目标指引下，策划办哪些事，是运筹的重要环节。运筹的结果是作出决策。不仅要

“谋”，而且要“断”，多谋加善断才可能产生优化的决策。谋事还包括抓住机遇，机遇不是随时都会碰到的，机遇的出现往往是短暂的，多谋才能发现机遇，善断才能抓住机遇。“成事在天”包含两个方面：其一，必须符合客观规律；其二，客观环境提供了机遇。

钱学森关于办事要“利用环境”的观点，是事理学的重要思想。不仅办事所需的物资、空间条件等硬的因素要从环境中获取，还有各种软的因素也取决于环境。办事所需要的条件常常不是事先全部给定的，许多条件要在事前经过努力利用环境创造出来。孙子强调要“造势”、“用势”，视之为取胜成事的关键之一。这也是利用环境。“势”是各种有利条件的凝聚。善于用势或造势意味着把环境和系统自身的一切有利条件充分凝聚起来，使要办的事不仅“势在必行”，而且“势不可挡”、“势如破竹”，最充分地利用环境。

贾雨文认为，现代流行的决策理论是从西方发展起来的理想系统决策理论，中国传统文化特别是以《孙子兵法》为代表的兵家倡导的是主动性（非理想系统）决策理论。它有四个基本范畴：形（资源，其量化形式是变量），势（形在运用中发挥效能的条件和程度），节（系统运行中的控制和策略运用的调节），策（策略、方案，数学上就是解、最优解）。其中形和策是与理想系统决策理论共有的范畴，势和节是非理想系统决策理论独有的范畴。理想决策理论的局限性已为中外学者普遍认可，应当寻找新的决策理论。贾雨文主张把传统的主动性决策理论提高到当代科学水平，作为系统科学的一个分支予以重建。要点是：（1）引入势效系数概念，作为势的量化形式（资源效能发挥程度的度量），建立势分析模型；（2）将系统运行从系统结构概念中分离出来，用结构—运行—功能分析取代以往的结构—功能分析；（3）决策适度性分析，承认决策适用条件是可变的，要确定决策的适用范围，预测和判

定决策条件的变化,超过这个范围就应当由其他决策取代;(4)伴随关系分析,一个对象系统的伴随系统是从该系统的环境中分离出来的一部分,如竞争对手、盟友等,它与对象系统强烈地相互依存,相互间有高强度的物质、能量、信息交换,优化的决策应当考虑这种伴随关系,查明在对象系统中采取的举措对伴随系统将产生何等影响,尽量使它们之间形成相互依存、良性循环的关系,这些都要求作伴随关系分析。^①

原则上讲,办任何事情都会遇到“逆境”因素,有时多有时少,通常总是较多的。需要区分三种情况:一是逆境因素可以忽略,看作在顺境中办事;二是在严重逆境中办事;三是在巨大灾难形势下办事。三种情况下的运筹决策应有不同的模式。德罗尔的著作作了开创性研究,对事理学有很好的借鉴作用。^②

建立事理学的运筹理论,要大力发掘谋略学的成果。古今中外有众多谋略学名著,有大量成功运用谋略的事例,可以借鉴。但谋略学至今还算不上真正的科学,基本属于潜科学。需要按现代科学的思想、规范加以改造,尽量采用一些有效的定量或半定量的方法。

13.6 事理模拟

由于复杂事理问题都具有重要社会影响,又不允许进行实际试验,一旦决策有误就会造成严重社会后果,在决策过程中充分利用大型计算机进行仿真模拟就成为科学办事的必要手段,事理模拟的理论和方法是事理学的重要组成部分。

^① 贾雨文:《关于主动性决策理论(非理想系统决策理论)的研究》,载《中国软科学》,1997(1)。

^② 叶海卡·德罗尔:《逆境中的政策制定》,上海,上海远东出版社,1996。

古代军事家已经有用模拟方法研究作战过程的创举，积累了大量成功的经验和理论概括。孙武关于“庙算”的理论，就包含有战前对作战过程的模拟研究。如王寿云所说：“他在写作不朽的军事哲学著作《孙子兵法》过程中，事实上是在自己的脑子里按不同的战斗条件推演了矛盾斗争的整个过程。他是军事史上第一个运用模拟作战的思想方法研究战争的伟大人物。”^① 捧读《孙子》，遥想当年孙武与吴王的论争及指挥操练的情景，诚然“如睹廊庙君臣密谋筹划之形，似闻沙场相扑厮杀之声”^②。

作战模拟在现代有了长足的发展，形成作战模拟学。这里作些简单介绍。

现代作战模拟是传统的图上作业、沙盘作业、实兵演习等自然发展的产物。钱学森指出：“战术模拟技术，实质上提供了一个‘作战实验室’，在这个实验室里，利用模拟的作战环境，可以进行策略和计划的实验，可以检验策略和计划的缺陷，可以预测策略和计划的效果，可以评估武器系统的效能，可以启发新的作战思想。”^③ 在模拟的可控制的作战条件下进行作战实验，能够对有关兵力与武器装备使用之间的复杂关系获得数量上的深刻理解。有了电子计算机技术，特别是虚拟现实技术，可以极为逼真地模拟现代化作战过程。海湾战争提供了最新且最有力的证明。

作战模拟的核心是战斗建模，建模的关键是提出合理的经验性假设（判断或猜想），基础工作则是学会运用历史的和演习的各种战斗的经验数据。按照王寿云的概括，作战模拟方法学的基本思想包括以下几点：

（1）从历史数据、演习数据和靶场实验数据的研究中提炼出

① 钱学森等：《论系统工程》，增订本，585页。

② 李世俊等：《孙子兵法与企业管理》，6页，南宁，广西人民出版社，1984。

③ 钱学森等：《论系统工程》，增订本，49页。

经验性假设。典型工作是兰彻斯特关于两种战术情况的假设：第一种情况的出发点，是假设双方战斗单位数量损失的速率正比于双方战斗单位数量的乘积；第二种情况的出发点，是假设每一方战斗单位的损失速率与对方战斗单位的数量成正比。王寿云研究发现，这两个假设的经验依据均可在克劳塞维茨的《战争论》中找到。

(2) 根据经验性假设建立战斗过程模型的数学表达式。例如，兰彻斯特根据第一个假设，用以下微分方程表示战斗过程

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\alpha xy \\ \dot{y} &= -\beta xy\end{aligned}\quad (13.2)$$

其中， x 、 y 代表作战过程中双方损失的战斗单位数量。根据第二个假设，用以下微分方程表示战斗过程

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\beta x \\ \dot{y} &= -\alpha y\end{aligned}\quad (13.3)$$

(13.2) 和 (13.3) 一起构成作战过程动态特性的数学模型。

(3) 从战斗过程模型演绎出结论。如通过研究上述微分方程组，兰彻斯特演绎出著名的线性律和平方律，建立了作战过程的定量化理论。

(4) 用战例和演习数据校验结论，核实模型（检验经验性假设）。如兰彻斯特用平方律解释车法加尔海战的结果，恩格尔用修正的兰彻斯特方程说明第二次世界大战期间美、日硫黄岛战役的结果等。

(5) 经过初步校验的战斗过程模型，可以应用于预测正在进行的或未来的类似战术情况的结局。

作战模拟是特殊的办事模拟，必定包含某些适用于其他事理过程的原理、方法和步骤。作战模拟学对建立一般的办事模拟学具有重要参考价值。正如当年把军事运筹学推广到民用部门一样，把作战模拟学推广应用于一般事理过程同样是可能且必要的。应

当说，对于建立一般办事模拟学，目前已具备初步的条件。

毛泽东在领导中国革命和建设的漫长过程中，对事理运动有多方面深入的探讨，创造了许多处理大型复杂事理问题的有效方法。典型试验、“解剖麻雀”就是著名的一例。应用现代科学技术加以充实改造，典型试验可以作为事理学的重要方法。

13.7 事理过程

俗话说：“物有本末，事有始终”。许多物理系统，如建筑物、山脉等，一般情况下无须作为过程看待，只须作共时性研究。但一切事理系统都是作为过程面展开的，是一种过程系统。办任何事情都是一种过程，必须当作过程系统进行历时性研究。这是事理系统的一大特点。运筹学家早已认识到“对研究结果的执行将是运筹学发展的重要趋势”^①。简单事理问题尚且不能认为有了科学的决策就等于办成了事，复杂的事理问题更需研究执行决策的过程，监督计划执行情况，控制办事过程的进展（称为工程控制或操作控制）。

战争作为一种特殊的事理运动，有一条重要的原则是“慎重初战”。因为一个战役的第一仗的成败往往能使整个战役处于截然不同的态势，慎重初战是军事家“造势”、“用势”的重要手段。这个原则对于一般事理运动也是适用的。大型复杂的办事过程的“第一仗”如何选择，是否获得全胜，往往使整个办事过程处于不同的态势中，故必须慎重。

凡过程都是由时段构成的。不论多么复杂的事理过程都会显示出阶段性、步骤性、程序性，必须把全过程划分为若干阶段，确定各阶段的独特任务、目标、中心问题等，解决各阶段之间的衔

^① 姜振寰主编：《交叉科学学科辞典》，339页，北京，人民出版社，1990。

接、协调问题，或不同程序的衔接、交叉、穿插等。在同一事理过程中，有些操作需先行实施，有些操作需要在另一些操作完成后才能进行，有些操作需要穿插进行，有些操作可以同时实施。对这些问题作科学的分析和合理的安排，是事理学方法的重要功用。

把运筹决策阶段制定的计划付诸实施后，常常发现计划走样了。因为在决策阶段有许多因素没有考虑到，或者是客观环境发生了预想不到的变化。愈是复杂大型的事理问题，运筹决策愈不可能在事情开始前一次完成，而应贯穿于整个办事过程。所谓办事过程的控制，包括调整修改计划安排、甚至改变预定任务。根据工作进展间隔性地修订运筹计划是事之常理。

事理既是可知的，又有不同程度的不可预见性。愈是复杂、大型、历时很长的事理运动，不可预见性愈强，事先能够作的运筹决策就愈加粗略，大量的运筹决策要在办事过程中进行。几百年来科学理性的辉煌胜利造成一种误解，只看到人们在实践中主动地制定计划并自觉地付诸实施，忽略了实践还有被动的一面和自发的倾向。实际情形常常是这样的，一个事理过程在按计划顺利进行，似乎一切都不出所料，但实际上某些未曾料到的因素、倾向正在悄悄地积累并放大，到达某些临界点，就会以明显的形态突然出现于人们的面前，打乱原有部署，使人处于被动局面，被迫改变计划，调整部署，甚至放弃目标，承担失败。必须充分认识事理有不可预见性的一面，树立人在办事过程中有被置于被动局面的可能性这种思想意识，才能够在办事过程中及时觉察问题，适时采取步骤，变被动为主动。要承认实践过程有自发性倾向，随时准备发现可能自发出现的新苗头、新问题，不断把自发性转化为自觉性。一旦被置于困境应如何处置，如何在逆境中把事办成，如何克服突然出现的危机，如何收拾败事的残局，都是事理学要研究的问题。

如何判别一件事办成办好，即事的评鉴（评审鉴定），是一个

办事过程的最后环节。从事前运筹到事毕评鉴，构成一次完整的事理运动。研究事的评鉴是事理学另一个重要课题。对事的科学评鉴与正确规定办事目标有很大关系。一个著名的经典例子是第二次世界大战时在商船上设置高射炮的举措。若以击落敌机为目标来衡量，这个举措是无效的，因为只有4%的来袭敌机被击落。若以保护商船免被击沉，有高射炮保护的商船被击沉的百分比同没有高射炮保护的商船相比，被击沉的百分比降低2倍以上，因而是很合算的。这就提出一个问题：在商船上装备高射炮这件事的目的是什么？商船的任务是运输而不是击落敌机，完成任务的前提是不被击沉。以这个标准衡量，这件事是办成了办好了。从这里可以看到一条事理：判定办一件事要解决的真正的问题是什么，关系到事情的全局，作出正确判定乃是事理学家重要的甚至主要的贡献。

事理学是一门急待建立的新学科。这是摆在系统科学界面前的一项重要任务。

思 考 题

1. 试析物理、事理、人理三概念。
2. 试给出事理的分类。
3. 说明信息概念在事理研究中的重要作用。
4. 从《实践论》、《矛盾论》看事理学的认识论基础。
5. 试析中国传统文化中的事理观。

阅 读 书 目

1. 许国志：《论事理》，载《系统工程论文集》，北京，科学出版社，1987。

2. 钱学森等：《论系统工程》，增订本，增订版说明、18~19页。
3. 苗东升：《系统科学辩证法》，第4章。
4. 张锡纯：《工程事理学发凡》，北京，北京航空航天大学出版社，1997。
5. H. A. 西蒙：《人工科学》，第1、2、5、6章。

第14章 运筹学

14.1 运筹学方法论

丘奇曼、阿可夫和阿诺夫在1957年出版的《运筹学方法》一书中，第一次系统地讨论了运筹学的方法论问题，把它归结为以下六点：

(1) 形成问题：弄清问题的目标、可能条件、可控变量以及有关参数；

(2) 构造模型：把问题中的可控变量、参数、目标和约束条件之间的关系按一定的模型表示出来；

(3) 求解模型；

(4) 解的检验：排除求解步骤和程序中的可能错误，检查解是否反映实际问题；

(5) 解的控制：通过控制解的变化过程，决定对解是否应作必要的改变；

(6) 解的实施：向实际部门讲清解的用法，在实施中可能产生的问题和修改等。

关于运筹学的方法论，西方学者普遍采用类似的表述，差别在于步骤划分等细节上。上述六点实际是应用运筹学原理和方法解决具体问题的基本步骤和主要操作，理论味不够。这与西方学者对运筹学的特殊理解有关，反映他们未能划清作为系统理论的

运筹学和以运筹学为理论根据的工程技术——系统工程的界限，混淆了运筹学方法论与系统工程方法论。

按照钱学森的学科划分观点，运筹学研究的主要内容是：

(1) 提出运筹问题：从千姿百态的实际事理问题中提炼出典型的运筹问题，描述其特殊的结构和运行特性；

(2) 建立运筹学模型：提出正确的假设，以便简化对象，把典型运筹问题表示为数学问题；

(3) 解决理论问题：阐述基本概念，证明有关定理等；

(4) 发展求解模型和分析解的特性的技术，特别是算法。

作为事理系统的一类，运筹学系统也具有(13.1)的形式。由于运筹学局限于有良好结构的事理系统，问题相对简单，可重复性较强，有明确的数学模型，只要作出决策，一个运筹问题就算解决了，不大关心实施决策的过程。因此有

$$\text{运筹系统} = \{\text{目标, 条件, 决策}\} \quad (14.1)$$

在给定的限制条件下寻找达到预定目标的策略或方案，就是运筹。

把问题表示为数学模型，关键是洞察该事理现象的数学本质。即使是研究简单事理问题的运筹学，也不能企图用统一的数学模型去描述。必须对运筹问题分类，把握每一类问题的特殊矛盾或矛盾的特殊性。目前的运筹学包括规划论（又可划分为线性规划、非线性规划、整数规划、几何规划、动态规划、随机规划等）、排队论、对策论、决策论、库存论、更新论、搜索论、网络分析、层次分析等分支，每个分支研究一类特殊的运筹问题，处理一类特殊的事理矛盾，需要一种特殊的数学模型和一套特殊的概念、词汇。它的方法论的哲学基础，就是毛泽东关于特殊矛盾或矛盾特殊性的理论。

把运筹问题表示为数学模型，具体体现于用数学形式表示事理目标和约束条件。能够用数学方法处理的事理系统总是涉及两类变量。一类是有待运筹人员选择或确定的变量，叫做决策变量，

即系统的状态变量。因为它们是运筹学家可以控制的量，又称为可控变量。另一类是环境参量，在每一个具体的运筹问题求解中都被认为是既定的、运筹人员无法改变的，如市场价格、总的资金、可用的劳力等，它们反映的是客观环境给予事理活动的限制条件，规定了决策变量的允许取值范围，又称为不可控变量。令 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 记决策变量，或以它们为分量表示为向量 X ，以 $c_1, c_2, \dots, c_k$ 记环境参量，或以它们为分量表示为向量 C 。如果能用适当的数学形式以这两类变量表示问题的目标和约束条件，就是该运筹问题的数学模型。有了模型后，剩下的工作是求解模型，分析模型，作出决策。在这个意义上，可以说决策就是计算。

就数学特征看，有两类运筹模型。一类是确定型运筹，如随机规划之外的各种规划。当系统的运行和实现都不依赖于随机因素、或者随机因素可以忽略不计时，可以采用解析数学形式描述事理问题，就是确定型运筹模型。但在许多情形下，运筹问题的不确定性是不可忽略的，运筹决策就是要从不确定性中寻找确定性，化不确定性为确定性。最常见的和研究最多的不确定性是随机性，基本的数学工具是概率统计。必须运用概率统计方法描述的是统计型运筹问题，相应的模型是统计模型。

运筹学研究的一个典型范例是丹捷格关于线性规划的工作。线性规划要解决的问题早已发现，但一直未能找到一般的数学表示形式。1946年，还在美军中服务的丹捷格接受上司的挑战，着手寻找一种方法，以便快速计算多时段的部署、训练和后勤供应的规划问题。受列昂捷夫关于投入产出工作的启示，丹捷格提出目标函数概念，作为描述这类事理目标的数学形式，用一组不等式表示各项活动之间相互制约的数量关系，作为这类事理问题的约束条件的数学形式，从而首次给出线性规划的数学模型。1947年，他又发明了求解线性规划的算法，即单纯形法。以后又证明重要的对偶定理。丹捷格的这些成就，使得线性规划发展成运筹

学中意义最大的一个分支。^①

解决运筹问题极需丹捷格式的数学才能和智慧，洞察问题的运筹学本质，提出新的科学概念，寻找适当的数学表达形式，解决有关的数学理论问题。但运筹学后来的发展中出现一种倾向，把越来越多的精力放在寻找算法上，甚至一味追求数学形式的漂亮，忽视问题的运筹学意义，忽视利用数学来论证问题的运筹学规律，更不注意从运筹学研究中“发现事理学性质的启示”（见钱学森致张锡纯的信）。许多著名学者对此提出批评是正确的。没有运筹数学就没有运筹学，但运筹学不仅仅是运筹数学。

14.2 线性规划

最简单但广泛存在的一类运筹问题，可以归结为有限资源的最优分配。这里讲的资源是广义的，包括办事需要的物资、原材料、能源、设备、资金、人力、时间、任务等。如 k 件产品在 l 台机床上加工的工序安排问题， n 项任务分配给 m 个单位或个人的任务指派问题， p 个产地的产品运往 q 个销地的运输问题，等等。处理这类问题的运筹学分支，统称为规划论。规划就是找出各种可能的行动方案，从中选择能够多、快、好、省（至少实现某一方面）地办成事情的方案。简言之，规划就是谋划、计算、选择、安排。

规划问题涉及两个集合：资源集 $(A_1, A_2, \dots, A_m)$ 和活动集 $(B_1, B_2, \dots, B_n)$ 。资源总是有限的，而需要得到资源的活动一般不止一项，这就产生了如何分配的问题。每项活动都希望获得尽量多的资源，每项活动都应照顾到，但由于不同活动项目的

^① 参见许国志、杨晓光：《运筹学历史的回顾》，载《系统研究——祝贺钱学森同志寿辰 85 周年论文集》。

重要性和收益不同，又不能平均分配。由此规定了分配问题的基本矛盾。共同分享资源，都为总效益做贡献，把 n 项活动联系在一起。同为 n 项活动所需要，把 m 项资源联系在一起。这就规定了规划问题是一种系统，需按系统观点分析，对各项资源和活动进行统筹安排，规划问题是以有待安排的事项（或有待确定的变量）为要素，以整体目标和约束条件相互制约为结构特征的系统，称为规划系统。解规划问题的含义是，从获取整体最大效益出发，通过对有关的变量、因素、手段的处理、改变和控制，调整内部关系，协调各种矛盾，使系统具有最佳有序结构，以求获得最佳功能。

一般情形下，可以假定各项资源都是给定的，没有不确定性。以 $b_1, b_2, \dots, b_m$ 分别记各项资源的总量。实际的环境参量都是可变的，具有不确定性。但在许多情形下，可以把这种变化作为扰动因素另行处理（如通过分析模型的灵敏性来反映扰动效应），因而可以假定环境参量也是给定的，没有不确定性。从这些假定出发，规划问题可以用确定型数学模型来描述。以 g 记规划问题的功利目标， g 应是决策变量的函数

$$\begin{aligned} g &= g(x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_k) \\ &= g(X, C) \end{aligned} \quad (14.2)$$

g 称为规划问题的目标函数。运筹决策意味着使目标函数最优化，即 g 取最大值或最小值

$$g = \max(\min) g(X, C) \quad (14.3)$$

约束条件表示各项活动或各个决策变量必须满足的数量关系，亦即各项资源总量对决策变量取值范围的限制

$$\begin{aligned} f_1(X, C) &\leq (\geq) b_1 \\ f_2(X, C) &\leq (\geq) b_2 \\ &\dots\dots\dots \\ f_m(X, C) &\leq (\geq) b_m \end{aligned} \quad (14.4)$$

目标函数 (14.3) 和约束条件 (14.4) 一起构成规划论模型的主要部分, 二者均为确定性数学表达式。一切可以用目标函数和约束条件刻画的事理问题, 均属于规划论的研究对象。

在实际的运筹问题中, 对决策变量还有其他补充要求。如规划论要求所有决策变量 x_i 不能取负数, 即满足非负性要求

$$x_i \geq 0, i=1, 2, \dots, n \quad (14.5)$$

整数规划还要求 x_i 取整数

$$x_i = 0, 1, 2, \dots, i=1, 2, \dots, n \quad (14.6)$$

目标函数、约束条件再加上这种补充要求 (也算约束条件), 才构成规划问题的完整数学模型。

如果 (14.3) 和 (14.4) 均为线性表达式, 即

$$\text{目标函数 } g = \max(\min)(c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n) \quad (14.7)$$

约束条件

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq (\geq) b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq (\geq) b_2$$

$$\dots\dots\dots a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq (\geq) b_m \quad (14.8)$$

$$\text{非负条件 } x_i \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (14.9)$$

则 (14.7)、(14.8)、(14.9) 一起构成线性规划的数学模型。

应用线性规划模型解决问题, 要求满足下述线性假设:

(1) 比例性, 即各项活动所使用的资源及它们对目标函数的作用与活动的水平成比例;

(2) 可加性, 即全部活动所使用的资源总数等于各项活动分别使用的资源数的总和。

在事理领域, 很多实际问题近似满足这两条假设, 可以把目标函数和约束条件都表示为决策变量的一次函数, 用线性规划方法来解决。

例 1 甲、乙、丙三种不同产品需要经过三种不同工序加工,

各种产品每件所需加工时间、各道工序每天的加工能力、每种产品的单位利润如下表所示：

工 序	每件加工时间 (分)			工序加工能力 (分/天)
	甲 品	乙 品	丙 品	
1	1	0	2	320
2	3	1	4	360
3	1	2	0	280
利润/件 (元)	4	2	5	

问题是如何分配三种产品的日产量，使得所获利润最大。

这是一个线性规划问题。令 x_1 、 x_2 、 x_3 分别记三种产品的日产量，数学模型为

$$\text{目标函数} \quad \max g = 4x_1 + 2x_2 + 5x_3$$

$$\text{约束条件} \quad x_1 + 2x_3 \leq 320$$

$$3x_1 + x_2 + 4x_3 \leq 360$$

$$x_1 + 2x_2 \leq 280$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

数学模型满足约束条件和非负性条件的解，称为线性规划的可行解，使目标函数达到最大值或最小值的可行解称为最优解。有了数学模型，首先确定可行解的范围，然后再从中寻找最优解。这需要有效的算法，单纯形法就是一切线性规划问题都适用的算法。

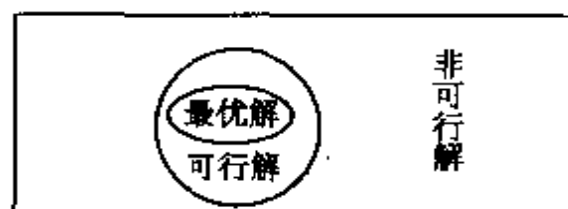


图 14.1

14.3 非线性规划

实际的规划问题都有非线性，线性假设只对其中一部分近似成立。在另外的情形下，问题本身的非线性因素不能完全忽略，目标函数和约束条件中至少有一个是非线性表达式，这种运筹问题要用非线性规划方法来解决。

例2 某公司经营甲、乙两种产品，产品甲的单件售价300元，产品乙的单件售价480元。 x_1 、 x_2 分别记两种产品的售出数量。据统计，出售一件产品甲所需营业时间平均为0.5小时，出售一件乙品为 $(6-0.35x_2)$ 小时，已知该公司的总营业时间为750小时，试制定使其营业额最大的营业计划。

根据题设，该公司的营业额为

$$g = 300x_1 + 480x_2$$

由于营业额的限制，营业计划必须满足

$$0.5x_1 + (6 - 0.35x_2)x_2 \leq 750$$

由此得到这个问题的数学模型为

$$\max g = 300x_1 + 450x_2$$

$$0.5x_1 + (6 - 0.35x_2)x_2 \leq 750$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

由于约束条件的左边包含决策变量的2次项，因而属于非线性规划。解这个规划问题，就是寻找目标函数在满足约束条件下的最优（大）值。

一般来说，解非线性规划问题要比解线性规划问题困难得多，目前还没有找到甚至不存在适用于各种问题的一般算法。虽然三十多年来非线性规划取得长足发展，在最优设计、管理科学、系统控制等领域获得广泛应用，但还远不如线性规划那样成熟。

作为数学规划的一个分支，非线性规划也属于寻优理论。在

数学上，就是寻找目标函数的极大值或极小值。对于线性规划而言，局部可行域上的最优解必定是整个可行域上的全局最优解。非线性规划不具备这个性质，从某个局部可行域中求得的最优解不一定是整个可行域上的最优解。这是系统的非线性因素带来的困难之一。

在微分学中，极值问题分无条件极值和条件极值两种。非线性规划为这个性质提供了新的实际背景。非线性规划也分为无约束极值和有约束极值两种，前者较容易解决，后者要困难得多。通常采用的办法是设法把有约束问题化为无约束问题来解决，甚至将非线性规划问题化为线性规划问题来解决。

14.4 动态规划

线性规划、非线性规划、整数规划、几何规划等的共同特点是静态性（瞬时性），所解决的问题与时间变量无关，可看作是针对某一时刻的系统状态进行规划，即规划是一次完成的，无须考虑事理活动的过程性。但大量实际的规划问题包含与时间有关的变量，解决一项规划问题是一种包含多个阶段的活动过程，每个阶段都要进行决策。例如，水库放水、航天飞机导航等。对于这类规划问题，决策不能一次完成，而是基于一个共同目标分阶段顺序进行一系列决策。处理这种多阶段序贯决策问题的运筹学分支，就是动态规划，特点是决策随时段而变化，是时段的函数，具有动态性。

例 3 有一批货物要从 A 地运往 E 地，有若干条公路可走，有 $B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3$ 等 6 个中间站，各站之间的距离（按行驶时间表示）标在图 14.2 上。问题是：从 A 出发应选择什么路线到 E 才能使行车时间最短？

动态规划的理论基础是贝尔曼的最优化原理。人类在面临序

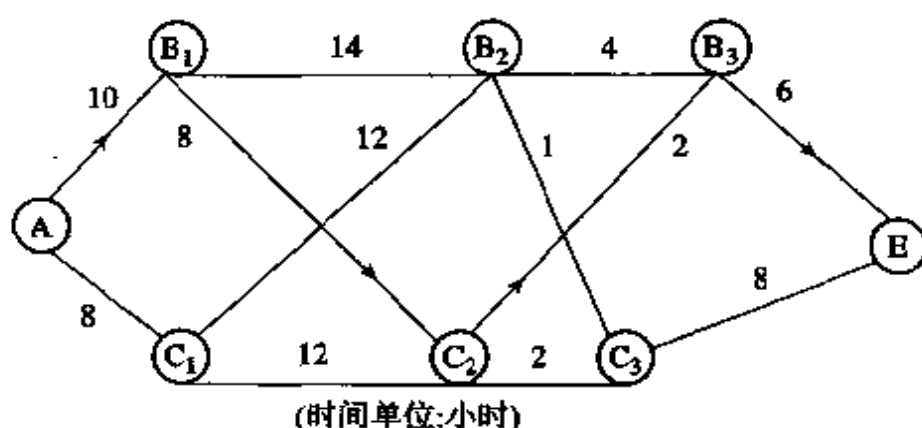


图 14.2

贯决策问题时，必定是从前面决策的后果（可能是非最优的，甚至是错误的）出发，力争后面的决策最优化。贝尔曼的最优化原理是对这种决策经验加以提炼而得出的。它的一般表述是：“一个最优策略具有如下性质：不论系统所处阶段的开始状态和开始决策如何，其余的决策对于由开始决策所导致的状态必须构成一个最优策略。”

解动态规划问题表现为一个过程系统，由若干相互联系的阶段组成，每个阶段可以看作一个静态规划问题。由于不同阶段的决策相互影响，全过程的最优决策并非各阶段最优决策的简单加和。但全过程毕竟是由各阶段构成的，在一些结构良好的事理问题中，整个规划的过程结构明晰确定：阶段划分，各阶段之间的衔接，各阶段的效能函数，都能够确切地表述和精确地计算。在这类问题中，可以把全过程的寻优工作分解为各阶段的序贯寻优。实际的操作是从后向前倒退着进行的，如图 14.3 所示。

仍讨论例 3。全过程和阶段的效能函数都是行驶距离（小时），是状态 B_i 、 C_j 的函数。从 E 开始反向计算。令 g_i 记第 i 步的最优决策。序贯决策过程如下：

(1) 第一步有两种可能路线选择 B_3E 和 C_3E ，效能函数为

$$g_1(B_3) = 6, \quad g_1(C_3) = 8$$

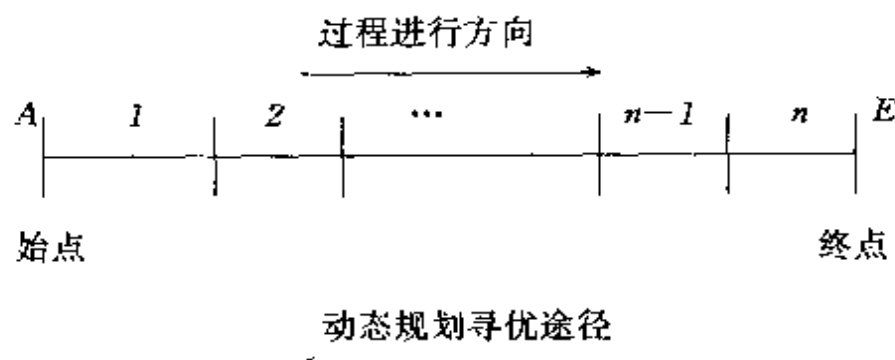


图 14.3

(2) 当系统处于状态 B_3 或 C_3 时, 都有两个可能的前站 B_2 和 C_2 。由 B_2 出发可从 B_2B_3E 和 B_2C_3E 中选择,

$$g_2(B_2) = \min \begin{Bmatrix} 1+8 \\ 4+6 \end{Bmatrix} = 9;$$

由 C_2 出发可从 C_2B_3E 和 C_2C_3E 中选择,

$$g_2(C_2) = \min \begin{Bmatrix} 2+6 \\ 2+8 \end{Bmatrix} = 8$$

最短路线为 C_2B_3E 。

(3) 当系统处于 B_2 、 C_2 时, 都有两个可能的前站 B_1 和 C_1 。由 B_1 出发可有两种选择

$$g_3(B_1) = \min \begin{Bmatrix} 14+g_2(B_2) \\ 8+g_2(C_2) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 14+9 \\ 8+8 \end{Bmatrix} = 16$$

由 C_1 出发也有两种选择

$$g_3(C_1) = \min \begin{Bmatrix} 12+g_2(B_2) \\ 12+g_2(C_2) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 12+9 \\ 12+8 \end{Bmatrix} = 20$$

最短路线为 $B_1C_2B_3E$ 。

(4) 全过程的选择 (决策) 为

$$g_4(A) = \min \begin{Bmatrix} 10+g_3(B_1) \\ 8+g_3(C_1) \end{Bmatrix} = \min \begin{Bmatrix} 10+16 \\ 8+20 \end{Bmatrix} = 26$$

最短路线为 $AB_1C_2B_3E$ 。

在典型的动态规划问题中, 序贯决策的“中间站”、各种可能

路线及其效能函数都是确定的，决策之前均可知道，因而制定规划可以归结为步骤和方法都确定的计算。复杂事理问题的序贯决策不具备这种条件，不能简单地套用这种方法。但最优化原理及相关的操作方法仍有参考意义。运筹学毕竟是一门特殊的事理学，可以为一般的事理学提供许多启示和借鉴。

14.5 排队分析

排队现象在社会生活中比比皆是，如理发、就医、机床维修、飞机着陆等等。有社会服务就有排队现象。服务活动是一种系统现象，由两种要素构成。提供服务的一方叫做服务台，可以是人、机器、动物、社会机构等。需要服务的一方叫做顾客，可以是人、机器、生物、社会机构等。顾客来到服务台要求服务，得到服务后旋即离去。顾客的到来是随机的，服务台的服务能力有限，因而形成随机聚散现象，顾客太多时出现拥挤，要求排队，无顾客时服务台将空闲，设备和人员闲置。在服务台收益与顾客需求、排队费用与防止排队的费用之间存在矛盾：服务台太少时，高峰期排队太长，顾客损失太大；若服务台太多，低峰期服务台空闲过多，经济损失过大。协调这些矛盾，使服务台与顾客的利益能够均衡兼顾，是运筹学的排队论要解决的问题。

排队现象可以看作具有如下结构的事理系统：

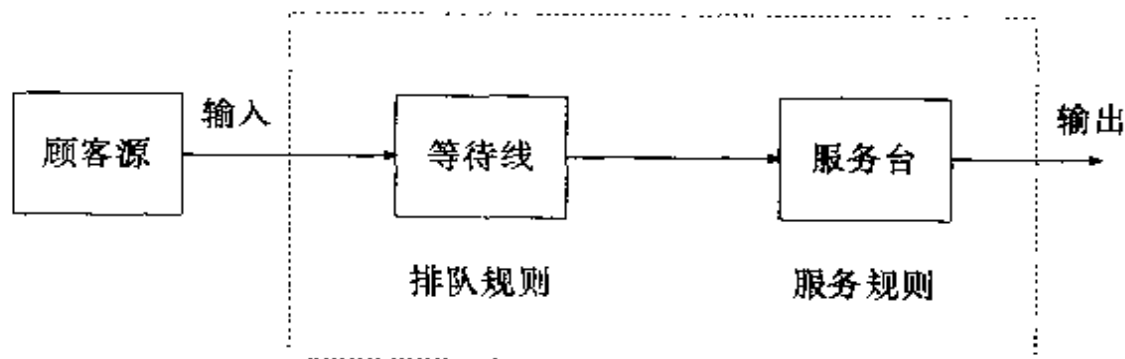


图 14.4

它由输入、排队、服务三个要素组成，顾客源为环境。一般情形下，顾客的到来是随机的，输入过程为随机过程，不同类型的随机输入过程决定系统不同的特性和描述方式。排队有不同的规则，等待线可以是有形的或无形的，可以是单线的或多线的，可以是一次排队或分段多次排队，可能允许顾客中间离开或不允许中间离开，等等。顾客等待线的特征取决于输入特性和服务台的特性、数量和服务规则，可能是先到先服务，或先到后服务，或优先服务，或随机服务，服务时间可能是均匀的或随机的，等等。这些特性决定应采用何种排队模型。

衡量排队系统的效益常用以下两个指标：

$$\text{服务台损失率} = \frac{\text{平均空闲台数}}{\text{服务台总数}} \quad (14.10)$$

$$\text{顾客损失率} = \frac{\text{平均排队人数}}{\text{顾客总数}} \quad (14.11)$$

在随机输入的情形下，顾客到达的时间间隔为随机变量，以 a 记它的数学期望。顾客接受服务的时间也是随机变量，以 b 记它的数学期望。对于单一服务台，爱尔朗数

$$\rho = \frac{b}{a} \quad (14.12)$$

为衡量系统拥挤程度（或空闲程度）的指标。

如果到达时间间隔是独立同分布的随机变量，且是负指数分布，服务时间也是独立同分布随机变量，与到达时间间隔相互独立，则有定理保证：

对于任一给定的大数 Q ，当 $\rho < 1$ 时，总有可能出现队长小于 Q 的状态；当 $\rho \geq 1$ 时，出现队长小于 Q 的状态几乎是不可能的。

排队论研究各种服务问题中的排队现象，排队现象本质上都是随机聚散现象，基本数学工具是概率统计，因而也称为随机服务系统理论。因所涉及的随机过程的性质不同，需要使用不同的数学模型。

14.6 对策分析

凡两方或多方为获取某种利益或达到某个目标而展开较量、导致优胜劣败的现象，叫做竞争。社会的一切领域，包括军事、经济、政治、体育、文化、科技、教育等，都有竞争。竞争是人类社会古已有之而且永远会有的现象。生物界也广泛存在竞争。甚至非生命界也离不开竞争，各种现代系统理论（如耗散结构论、协同学、超循环论、突变论等）都试图引入竞争概念，去解释广泛的系统现象。

竞争参与者在同对手竞争中可能采取的行动方案，叫做它的策略。按照这种广义的理解，一切竞争都是策略性的。狭义地讲，竞争应有策略性与非策略性之分。生物之间的竞争一般应属于非策略性竞争，因为双方都算不上理性的参与者，基本是弱肉强食。非生命的物理化学系统完全没有理性，它们之间的竞争更不是策略性的。如果双方不但有利害冲突，而且都能理智地使用策略，力求发扬自己的长处，克服或避免自己的短处，抑制对方的长处，利用和扩大对方的短处，从而战胜对手，这种竞争就属于策略性的。这是人类社会特有的现象。研究策略性竞争的运筹学分支，叫做对策论或博弈论。

对策问题是以局中人、策略和得失三者为要素的事理系统，应当用系统观点来分析。

局中人 参与竞争、拥有选择和实施策略的权力并且直接承担竞争得失的实体，称为对策活动的局中人。局中人可以是个人、球队、公司、集团、国家或国家集团等。

策略集 在策略性竞争中，每个局中人都可能有多个不同的策略即行动方案可供选择，形成一个策略集。只有一种行动方案的竞争不是策略性对策，无须作理论研究。在一局对策中，各个局中

人所选定的策略形成的策略组称为一个局势。

赢得函数 一场对策结束，局中人或赢或输，或得或失，或胜或负，统称为得失。局中人在对策较量中的得失，既取决于他所选择的策略，也取决于对手选择的策略，即得失是局势的函数，称为赢得函数。

给定局中人、局中人的策略集和他们的赢得函数，一个对策系统就算给定了。因此有

$$\text{对策系统} = (\text{局中人}, \text{策略集}, \text{赢得函数}) \quad (14.13)$$

实际生活中的对策现象非常普遍，如下棋、打牌、球赛等。“齐王赛马”故事是我国古代一次著名的策略性竞争。局中人是齐王和田忌（孙臆是田忌的谋士而非局中人），各有 6 个策略

(上马，中马，下马)，(上马，下马，中马)

(中马，上马，下马)，(中马，下马，上马)

(下马，中马，上马)，(下马，上马，中马)

以 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 记齐王的策略，以 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ 记田忌的策略，则齐王的赢得表为

齐王赢得 田忌策略	齐王策略					
	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
α_1	3	1	1	1	1	-1
α_2	1	3	1	1	-1	1
α_3	1	-1	3	1	1	1
α_4	-1	1	1	3	1	1
α_5	1	1	-1	1	3	1
α_6	1	1	1	-1	1	3

齐王的赢得函数（矩阵）为

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 3 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 3 \end{bmatrix} \quad (14.14)$$

对策的分类 按照局中人的数目划分，有二人对策和多人对策。按照策略集的有限或无限划分，有有限对策和无限对策。按照局中人相互间是否结盟划分，有结盟对策和不结盟对策，前者又分联合对策和合作对策。按照赢得函数的性质划分，有零和对策与非零和对策。按照策略与时间的关系划分，有静态对策和动态对策，后者主要指微分对策。图 14.5 给出主要对策的分类。

最简单的是两个局中人、策略集均为有限的、赢得之和为零的情形，叫做二人有限零和对策。由于主要数学工具是矩阵论，又叫做矩阵对策。设局中人为 I、II 策略集分别为

$$S_1 = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\} \quad (14.15)$$

$$S_2 = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\} \quad (14.16)$$

当局中人 I 选定策略 α_i 、局中人 II 选定策略 β_j 时，就形成一个局势 (α_i, β_j) ，相应的各有一个得分，共有 $n \times m$ 个局势，形成一个 $n \times m$ 阶得分矩阵，即赢得矩阵。令 A 记局中人 I 的赢得矩阵。在前述齐王赛马的例子中，给出了齐王的赢得矩阵。当局中人 I、II 和策略集 S_1 、 S_2 及局中人之一的赢得矩阵 A 给定后，矩阵对策的数学表示 G 就是

$$G = \{I, II, S_1, S_2, G\} \quad (14.17)$$

给定对策系统 (14.17) 后，下面的工作就是作数学的分析计

算。对策论的任务是研究对策行为中局中人是否存在最合理的行动方案，以及如何找到合理的行动方案的数学理论和方法。

鉴于竞争问题在系统理论中有广泛而重要的应用，以及它作为一门学科的发展势头，将来可能需要把它作为技术层次的系统科学的一个独立分支。

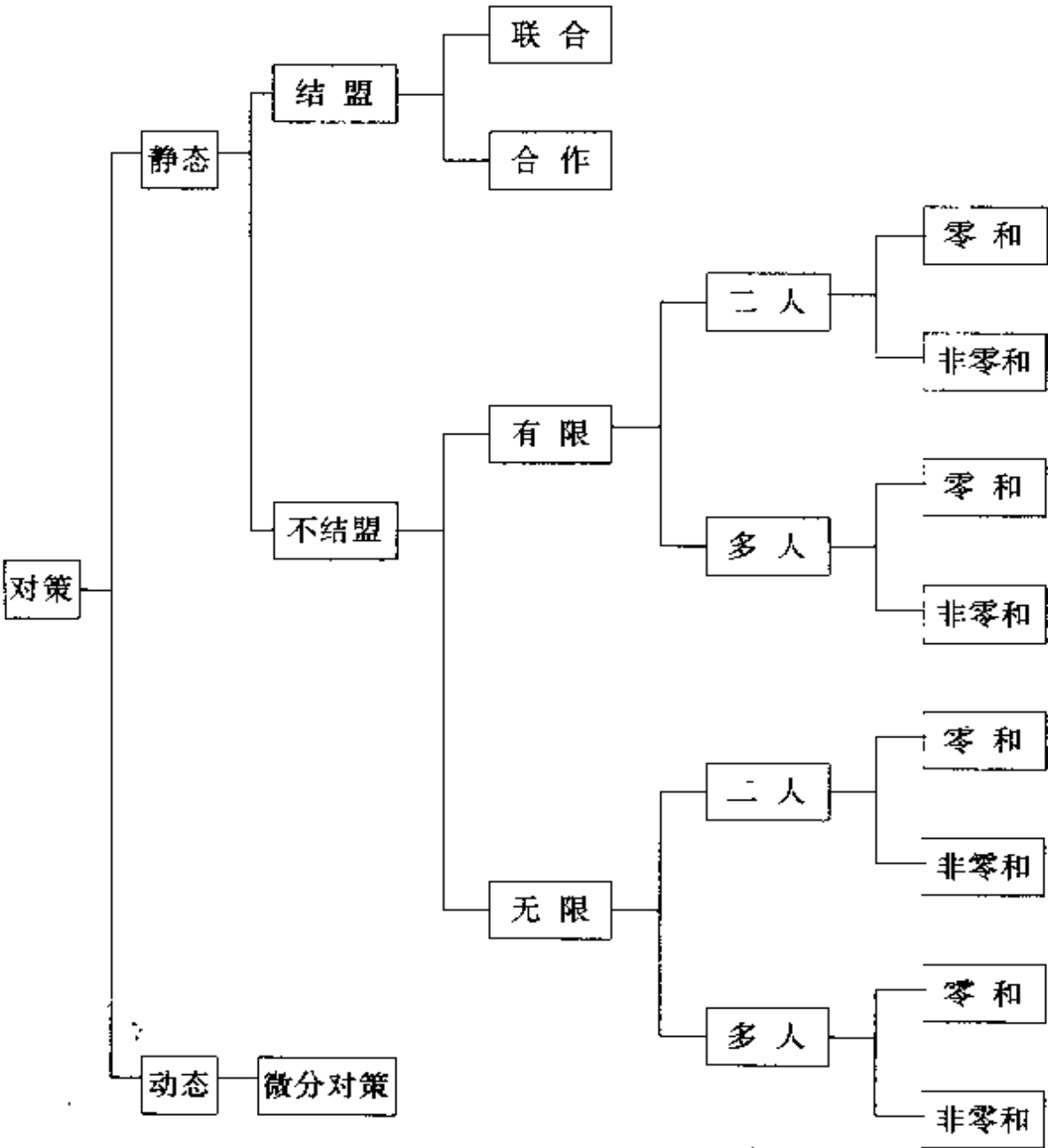


图 14.5

14.7 决策分析

做任何事情都要决策，决策总是针对环境作出的。环境有不同的状态或态势，可看作环境能够采取的策略。因此，决策可看作以决策者和环境即“大自然”为局中人的二人对策，特点是“局中人”大自然不是理智的对弈者，不会有意选择能使决策者陷于困境的策略。决策就是决策者根据环境的可能状态选择自己的最优策略进行对策。

设“大自然”有 m 个可能状态 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ ，决策者有 n 个可能的策略 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ ，大自然选择 β_j 而决策者选择 α_i ，形成一个局势，决策者的益损值为 a_{ij} ，得到他的决策表（赢得矩阵）

益损值 策略 \ 自然状态				
	β_1	β_2		β_m
α_1	a_{11}	a_{12}		a_{1m}
α_2	a_{21}	a_{22}		a_{2m}
$\vdots$				
α_n	a_{n1}	a_{n2}		a_{nm}

决策表中的益损值构成一个矩阵，叫做益损矩阵

$$A = (a_{ij})_{nm} \quad (14.18)$$

根据不同事理问题的特性，决策分析常分为确定型、风险型、不确定型三类。前面介绍的三种规划都是在确定的条件下进行的，属于确定型决策。基本特征是：(1) 存在决策者希望达到的一个明确目标；(2) 只有一个自然状态，且是确定的；(3) 存在可供决策者选择的不少于两个行动方案；(4) 不同行动方案在确定

状态下的益损值可以计算出来。决策判据是在给定的自然状态下能获得最高效益。各种规划论介绍的方法都是确定型决策方法。

当存在两个或两个以上的自然状态、各以一定概率出现、决策者可以预先确定这些概率时,可用风险型决策。有多种可行的方法。这里只简单介绍决策树方法(决策树概念见下节)。

例5 为生产某种产品提出两个建厂方案。建大厂需投资 180 万,建小厂需投资 80 万,使用期限均为 10 年。估计在 10 年中,产品销路好的可能性为 0.6,销路差的可能性为 0.4。两个方案的年度益损值列表如下:

自然状态	概 率	建大厂	建小厂
销路好	0.6	80	40
销路差	0.4	-25	15

决策表

用决策树表示为

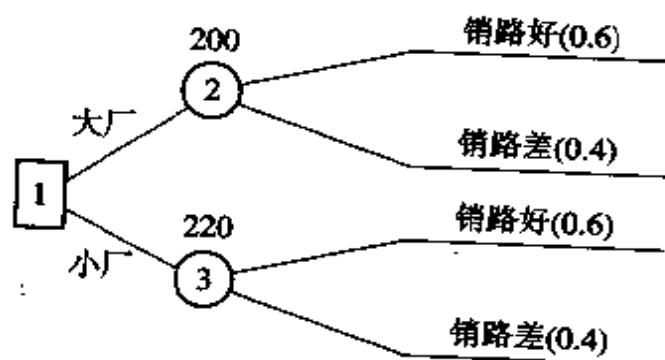


图 14.6

画出决策树,可以计算期望益损值及其最优化。在我们的例子中,计算得

$$\text{点 2: } 0.6 \times 80 \times 10 + 0.4 \times (-25) \times 10 - 180 = 200$$

$$\text{点 3: } 0.6 \times 40 \times 10 + 0.4 \times 15 \times 10 - 80 = 220$$

两种方案比较,建小厂是最优方案。

当决策者对自然状态的发生概率无法预先估计,但必须作出决策时,须采用不确定型决策。有所谓乐观法、悲观法、等可能法、后悔值法等。这是没有办法的办法。实际上,这类问题的困难往往并不只是自然状态的概率不能预先知道,而是涉及复杂的事理关系。因此,把这些问题归于事理学范畴,或许能找到较为有效的处理方法。

14.8 网络分析

人们在实际生活中常常用图来表示事理现象,用点代表涉及的事件,用线表示事件之间的联系。如联络图、关系图、电路图、交通图、军事对阵图、竞技比赛图等。用数学语言表示,令 V 记一个点集合,它的元素称为顶点, E 记一个线段集合,它的元素称为边,则称偶对 (V, E) 为一个图 G ,记作 $G(V, E)$ 。

我们只讨论顶点和边均为有限数的有限图。有时需要区分联线的方向,用带箭头的线段表示边。这种图称为有向图,如图 14.7 (b)所示。一般图称为无向图,如图 14.7(a)所示。本书已出现过许多图,包括有向图和无向图。

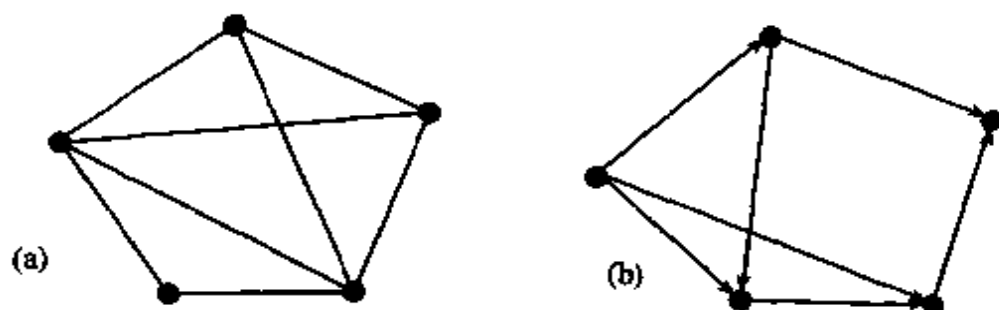


图 14.7

给定图 $G=(V, E)$ 中的一个点与边的交错序列 $(v_i, e_i; v_{i+1}, e_{i+1}; \dots; v_{i+k}, e_{i+k}; v_{i+k+1}=v_n)$, 如果每个 e_j 恰好是联结相邻的左右两个点 v_j 和 v_{j+1} 的边, 就称该序列为一条联结 v_i 和 v_n 的链, 记作 $(v_i, v_{i+1}, \dots, v_n)$ 。若图 G 中任何两点之间至少有一条链, 就称 G 为联通图, 否则称 G 为非联通图。图论讲的图不同于几何学或物理学的图, 是一种拓扑图, 图中点与点的相对位置、点与点之间联线(边)的曲或直、联线的长短等, 一般并不重要, 主要关心的是点与点之间是否联通。如在图 14.3 中, 边 B_2B_3 长度为 4, B_2C_3 长度为 1, 显然不是几何长度。

图的最本质的内容是一种二元关系, 即顶点和边的关联关系, 因而代表一定的系统, 顶点代表元素, 边反映结构。一个系统若具有二元关系, 便可以用图来作数学模型。研究图的数学分支叫做图论, 是描述系统特性的有力工具。图论中的定理一般均有事理含义, 刻划某个事理; 可用图描述的事理, 总可用一个或若干个图论定理来表述。例如, 图论的一个最简单的定理说, 任意一个图一定有偶数个奇顶点(若图 G 中与顶点 V 关联的边数为奇数, 就称 V 是奇顶点)。这个定理表示, 在一次集会中与奇数个人握手的人的个数是偶数; 或者说, 在一次交易会上, 与奇数个单位洽谈的单位的个数是偶数。

运筹的网络模型是一种特殊类型的图, 即无闭合回路的有限有向图。边表示运筹工作的单独步骤, 点表示事件, 每个事件标志它前面的运筹步骤的结束和后面步骤的开始。所有事件分为开始事件、中间事件和终止事件。网络模型中的工作或活动有不同含义: (1) 指一项需要人力、物资和时间的具体工作或活动; (2) 指一个等待, 它不需要花费人力物力, 但需要一定量的时间; (3) 指虚拟工作或虚拟活动, 它不需要花费人力、物力、时间, 但能指明在某一事件出现之前不可能开始某一项工作。网络结构反映准许开始各项工作的条件, 从网络中第 i 个点出发的工作, 只能在进入第 i 个

点的一切工作均已完成后开始。依据这种网络即可制定和修订运筹计划。

办事过程或事理运动过程是由人流、物流(包括资金流)、时间流和信息流构成的,涉及通路、用时、流量和费用等指标。运筹工作归结为制定能够找到最短的通路、最少的用时、最大流量、最小费用的计划。有了网络图,即可按照图论的原理和方法进行分析计算。因此,网络分析的典型问题主要是最短路问题、最大流问题和最小费用问题。

一种十分简单而非常有用的图叫做树。树是我们司空见惯的东西。经过数学抽象,树可以代表一种由根、枝、叶组成的形式化系统。严格地说,树被定义为一个无闭合回路的连通图。树中的边称为树枝,起始点称为树根,终止点称为树叶。树是刻画一类系统的理想数学模型,形象地描述了系统的结构、分支关系和演化途径,有广泛的用途。如家谱树、语法树、生长树、演化树、决策树等。从第7章可看到演化树在研究自组织现象中的应用。

决策树(见图14.6)是一种水平生长的树,有两种顶点(决策点与机遇点),两种分支(方案分支和结局分支)。 $\square$ 记决策顶点,由它引出一组方案分支,表示决策中可供选择的行动方案。 $\bigcirc$ 记机遇顶点,表示由该点可能导致的多种结局。方案顶点上方注明该方案的益损期望值,结局分支说明它的自然状态和发生概率。这样,决策过程涉及的各种因素、关系、数量特征都一目了然地呈现出来了。

网络理论在系统工程中有大量而直接的应用。

14.9 库存分析

经济活动贯穿着供应与需求、生产与销售的矛盾,为克服供求、产销的不协调,加入存储环节。商店存货不足会发生缺货现

象,因坐失销售机会而减少收益。工厂原料储备不足,势必停工待料,造成减产损失。防止缺货损失需要尽量多的储备。但存货需要支付存储保管费,过多的存储导致物资积压,造成存储损失。这是事理领域的又一对重要矛盾。探讨存储问题的规律性,制定合理解决存储损失与缺货损失这对矛盾的一般策略,为库存系统的优化设计和控制提供理论和方法的运筹学分支,称为库存论。

库存系统是由存储库、输入通道和输出通道构成的。从系统运行和定量描述的角度看,这个系统的构成要素为:

需求 库存系统的输出叫做需求。库存的目的是满足需求,满足需求的结果是减少库存。需求量可能是确定的,即在相等的时间需求其变化率是相同的,可以预知。多数情况下需求量是不确定的、随机变化的,无法预知每个时期的需求量,但可预知其发生概率。

供应 库存系统的输入称为供应。有供应才有存储的可能,供应的结果是存储增加。供应分购进式和生产式两种,购进一般是瞬时供应,生产一般是平均供应。供大于求,系统须支付存储费用;供不应求,系统要承受缺货损失。

费用 包括订货费、生产费、存储费、缺货费等,衡量系统性能优劣的指标是总费用最小。

存储策略 供应时间及每次的供应量一般是不同的,总费用也不同,由此规定了运筹安排的必要性。决定何时供应、供应量多少的方案,称为存储策略。常见的存储策略有三种:(1)定期定量策略,即每隔一定时间 t_0 向系统供应一定量 Q 的货物,又称为 t_0 -策略;(2)标准量策略,每当系统实际库存量 $x \leq s$ (规定标准)时,立即开始供应以达到 S ,当 $x > s$ 时不供应,又称为 (s, S) 策略;(3)混合策略,每隔 t 时间检查库存量, $x > s$ 时不供应, $x \leq s$ 时补充供应,使库存量达到 S 为止,又称为 (t, s, S) 策略。

制定库存策略的方法是：首先建立库存系统的数学模型，然后求出模型解，再结合库存问题的实际加以检验和修正。简单的库存问题可用确定型模型，又分四种基本类型：(1)无限供给率、不许缺货型；(2)有限供给率、不许缺货型；(3)无限供给率、允许缺货型；(4)有限供给率、允许缺货型。一般情况下，需求量是随机变量，作为其函数的存货量和缺货量也是随机变量。像季节性存储品或短寿命物品，库存问题产生于对物品只要求订货一次以满足一个特定时期的需要，可采用单时期模型。当需要周期性地再订货时，采用多时期模型。根据需求量有无积累和交货有无延迟，也分四类：(1)有积累、无交货延迟模型；(2)有积累、有交货延迟模型；(3)无积累、无交货延迟模型；(4)无积累、有交货延迟模型。

思 考 题

1. 规划论的系统思想体现在哪里？
2. 试给出儿童玩“石头，布，剪刀”对策游戏的赢得函数。
3. 就动态规划说明运筹学处理的只是结构良好的事理问题。
4. 指出最优化原则的适用范围和采用令人满意原则的必要性。
5. 有人说：“运筹学是一种给出问题坏的答案的艺术，否则的话问题的结果会更坏。”您如何理解这一论断？

阅 读 书 目

1. 钱学森等：《论系统工程》，增订本，16~19、79~83、177~179、263~267 页。
2. 苗东升：《系统科学原理》，第 7 章。
3. 《运筹学》教材编写小组：《运筹学》，绪论，北京，清华大学出

版社,1990。

4. 胡宣达:《运筹学方法》,载《方法论全书(Ⅱ)》,南京,南京大学出版社,1995。

第 15 章 模糊学

从扎德 1965 年发表的开创性论文《模糊集合》肇始,经过 30 多年的探索,形成了模糊学(或称模糊性科学)这门范围广阔的新学科。它以现实世界广泛存在的模糊性及其在人脑中的反映为研究对象,以模糊集合论为数学工具,力图在理论上把握模糊性,在实践上处理模糊性问题,建立了一套独特的概念体系和方法论框架。无论从它的发生发展历史看,还是从它的主要应用领域看,这门新学科的核心都是模糊系统理论。

15.1 精确方法的局限性

近代和现代科学的基本信条之一是精益求精,在科学活动的每个环节都追求精确:精确的语言表述,精确的逻辑论证,精确的测量计算,精确控制的实验。高度发展的科学技术,现代人享受的物质文明,都是精确方法的产物。电子计算机的发明使计算精度达到 10^{-15} ,极高的运算速度,极大的信息容量,使人类的计算和信息处理能力达到前所未有的水平,大大提高了精确方法的威力。伴随着这些成就,精确科学也造就出一种系统化的方法论观点:精确被当作纯粹的褒义词,模糊被当作纯粹的贬义词,精确总是好的,模糊总是不好的,越精确就越好;科学的方法必定是精确的方法,模糊方法一概是非科学的方法,或前科学方法,即在尚未找到精确方法之前不得不采用的权宜方法;一切都应当精确化,一切都能够精

确化,今天还没有精确化的东西,明天或后天就可能精确化;一种精确化努力失败了,人们怀疑的只是实现精确化的具体方式,从不怀疑精确化本身,完全没有意识到精确方法可能有局限性。这种方法论观点反映在科学知识的各个领域,包括系统科学。

一切绝对化的观点都是一种形而上学。科学的发展有其自身的逻辑。随着科学研究的对象从小系统经大系统转向巨系统,从机械系统转向非机械系统,从物理系统转向事理系统,从简单系统转向复杂系统,尤其是转向人的感情、推理、策略、行为起重要作用的人文社会问题这种特殊复杂的巨系统时,精确方法日益受到挑战,逐步暴露了它的局限性。

在大系统、复杂系统、生命系统、特别是人文社会系统中,许多概念既无明确的外延、又无明确的内涵,属于所谓模糊概念。小系统和大系统就是一对模糊概念,无法划出精确的界限。这些领域大量使用模糊命题,对于这类命题我们无法作出或真或假的二值判断。例如,对于像“决策方案A的风险很大”、“系统B的可靠性好”之类模糊命题,我们只能判断它们属于真命题的程度。信息学至今未能找到描述语义信息的有效途径,原因在于语义一般都有强烈的模糊性,无法作精确处理。描述人文社会系统时,人们的推理常常不按照严格的逻辑规则进行,惯于采用近似的或模糊的规则,作近似的或模糊的推理。人文社会系统一般不允许进行试验,更不可能作精确控制的试验。

精确方法在复杂系统研究中遇到的最大挑战,来自数学模型的使用上。精确方法的核心是建立数学模型,通过求解模型引出基本结论。但对于明显存在模糊性的复杂系统现象,原则上无法建立精确的数学模型。“结构不良”的事理系统就是如此。没有数学模型,精确的定量分析便无从谈起。基于数学模型的定量描述要求有完备而足够精确的数据资料。但任何观察、测量和计算的精确性都受到技术水平的限制,复杂系统特别是人文社会系统往往难以获

得这样的数据资料,精确方法便失去使用的前提。

极大地提高了精确方法可行性的电脑技术,也有力地暴露了它的局限性。人类生活的各方面都经常进行模式识别,信息化更把图像识别和语音识别提到重要地位。人脑凭借少许模糊特征能很容易地识别对象,电脑由于过分严格精确而无法像人脑那样识别对象,精确性带来的是机械刻板性,对象稍有变化就“翻脸不认人”。迄今的电脑只接受形式化的精确语言,人脑使用的是模糊性很强的自然语言,人-机对话、人-机协调问题便无法用精确方法解决。

精确方法的局限性在不同学科领域都有所显现,在系统科学中暴露得尤其充分而深刻,引起系统科学家从各自的方向探索克服这种局限性的途径。

模糊学的创立者扎德是一个突出代表。这位对精确科学有重要贡献的系统科学家,在从事工程控制、决策分析、人-机系统的长期研究中,对复杂性、模糊性与精确方法的矛盾有深入的理解,认识到在控制和系统理论中,过分考虑精确性并无良好效果,对于人文系统或复杂性可以同人文系统相比较的任何系统,传统的定量系统分析方法是不适用的。他用所谓不相容性原理(或称互克原理)对精确方法的局限性作了高度概括的表述:“随着系统复杂性的增加,我们作出关于系统行为的精确而有意义的陈述的能力将降低,越过一定阈值,精确性和有意义(或适用)几乎成为相互排斥的特性”^①。

科学的描述必须是有意义的,必须反映系统的真实情况。当精确描述只能得到无意义的结果时,精确方法就不再是科学的方法了。

^① Zadeh, L. A. : Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. 1973(2).

15.2 模糊性与模糊方法

从日常生活到科学研究,都要求给认识对象分类,以类聚物,以群分人。有些事物有明确的类属,可微函数,最优解,稳定系统,男人,已建交国家,都属于确定的事物类;对象或者属于、或者不属于某一类,明确肯定。事物类属的确定性,叫做明晰性。有些事物没有这种明确的类属关系,大数,小系统,聪明人,友好国家,都属于不确定的事物类,一个对象是否属于某一类,无法作出明确肯定的回答。事物类属的不分明性,叫做模糊性。

分类总是依据某个标准进行的,标准就是对象具有某种性态。有些事物是否具有某种性态是明确肯定的,要么具有某种性态,要么不具有该性态,非此即彼。可微性是函数的一种性质,一个函数在某一点要么可微、要么不可微,明确肯定,不存在在一定程度上可微又不完全可微的现象。以这种性态为标准进行分类,事物的类属是明确的。有些事物是否具有某种性态并不明确,在一定程度上具有,又不完全具有。按照这种性态进行分类,事物的类属是不确定的。事物性态的不确定性,就是模糊性。

从哲学上看,一切对立的两极都通过中介而相互过渡。处于中介过渡环节的事物的性态必有某种不确定性,既有这一极的特征,又有那一极的特征。有些两极对立的中介状态不发达,允许忽略中介,把事物看作非此即彼的。这就是那些类属分明的事物。明晰性就是事物的非此即彼性。有些对立具有发达的中介,不允许忽略它们,认识事物的关键是把握这种中介过渡的环节、亦此亦彼的特征,把握两极对立的不充分性和自身同一的相对性。这种中介过渡性、亦此亦彼性,抑或两极对立的不充分性、自身同一的相对性,就是模糊性。

精确方法要求忽略中介,或者穷举中介、逐个研究。但从事物

横的联系方面看,对于那些在几何的或性态的空间中或在结构上相互联结的东西,完全不允许忽略中介,也不可能穷举中介,有效的办法是对中介加以分类(分级、分档、分区)。从事物的历史发展看,人们不能穷举每个中介时刻而应加以分期。分期也是分类。把无穷连续过渡的中介分为有限的类别,把大量彼此没有明显差异的中介分为少数几类,这样的类别之间很难有截然分明的界限,大量的中介显得没有确定的类属。所以,模糊性强烈地表现在空间中或结构上的边缘区或结合部,表现在两个发展过程之间的过渡阶段。事物的模糊性归根于事物的普遍联系性和发展变化性。变化是对原有界限的否定和超越,除了那些瞬间突变的事物外,大量事物的变化是通过使原有界限逐步模糊化而达到的,处于过渡阶段的事物的基本特征是性态的不确定性、类属的不分明性,即模糊性。

模糊性的存在是客观的、普遍的,自然界存在大量模糊事物,社会生活中的模糊事物更为广泛,自然语言、人类思维中大量存在模糊性。在科学技术领域,每个知识部门都有模糊概念、模糊命题,最讲精确性的数学中也不难发现模糊概念,人文社会科学更充斥着模糊概念和命题。实际事物或多或少都有模糊性,明晰性是忽略中介过渡的理想形态。因此,科技的发展、社会的进步要求制定一套描述和处理模糊性的方法论。

模糊学代表一种关于现实世界的基本看法。传统观点认为,现实世界本质上是简单的、精确的、完全确定的,对一切事物均可以用简单而确定的模型作出精确的描述。模糊学向这种观点提出挑战,宣称现实世界在本质上是复杂的、不精确的、具有不确定性的,简单而精确的模型只能描述那些明晰事物,应当用模糊方法描述模糊事物,把复杂事物当作复杂事物来处理,把模糊事物当作模糊事物来处理。

经典科学对待模糊事物的方法,是人为地划定一个界限,使所

有事物都有一个明确的类属。这是以不承认或简单地排除模糊性来对付模糊性,适用于中介不发达的明晰事物,对于中介发达的模糊事物就无能为力了。如大、小系统本无明确的分界,以 n 记系统的元素数目,人为地确定一个标准 N , $n < N$ 为小系统, $n \geq N$ 为大系统,就排除了模糊性,每个系统都有一个明确的类属,可以作出非此即彼的二值判断。但人为因素太明显,难以反映实际情况。特别是当 n 接近于 N 时,这种处理方法尤其失真,没有客观意义。

模糊学是一门方法性科学。它并不否定精确方法的科学性,只是否定它的普遍适用性和绝对有效性,要求承认模糊方法也可以是科学的方法,对于模糊性强烈的事物,只有模糊方法是有效的方法。模糊方法的基点是承认模糊性。不论什么知识领域,只要从模糊性的角度去观察对象,就会发现该领域中原来所用的方法和得到的结论都有局限性,从而提出新问题,形成新观点,开辟新的子领域。凡是从模糊性角度提出问题、分析问题和解决问题的方法,不论是经验的还是理论的,定性的还是定量的,都是模糊方法。但模糊学对方法论的主要贡献是制定一套描述模糊性的数学语言,使古已有之的模糊方法上升为现代科学方法体系中的一个有机组成部分。

15.3 模糊集合

精确数学的基础是经典集合论,它有一个未曾言明的假定:对于论域上的任一元素 x 和任一集合 A ,要么 $x \in A$,要么 $x \notin A$,二者必居其一且只居其一。这是精确分类的形式化表述,一个集合代表一个对象类。以这个概念为基础,可以精确地定义其他数学概念,精确地塑述和证明一切数学定理,建立对系统进行精确化定量化描述的理性工具,但同时也使这种数学失去描述模糊性的能力。

要提供描述模糊性的数学工具,必须放弃上述假设,建立新的

集合概念。应该把元素对集合的隶属关系模糊化,允许论域上存在部分地属于集合又部分地不属于集合的元素,变绝对的隶属为相对的隶属。应把属于关系定量化,承认不同元素对集合的隶属程度不同,引入隶属度概念。以 U 记论域, A 、 B 等记 U 上的模糊集合, μ 记隶属度。以 $\mu=1$ 表示 U 中百分之百属于 A 的元素的隶属度, $\mu=0$ 表示 U 中百分之百不属于 A 的元素的隶属度, $0<\mu<1$ 记部分属于部分不属于 U 的元素的隶属度,较大的 μ 对应隶属度较大的元素,就得到模糊集合(模糊类别)的某种数学刻划。

定义 1 论域 U 上的模糊集合 A 是由一个从 U 到区间 $[0,1]$ 的实函数

$$\mu_A:U\rightarrow[0,1] \quad (15.1)$$

表示的。对于任一 $u\in U$, $\mu_A(u)$ 为元素 u 对集合 A 的隶属度, μ_A 称为模糊集合 A 的隶属函数。

论域上的经典集合是一个边界确定的区域,文氏图用实线圆表示它。模糊集合是一种边界游移不定的区域,可用虚线圆表示,如图 15.1 所示。

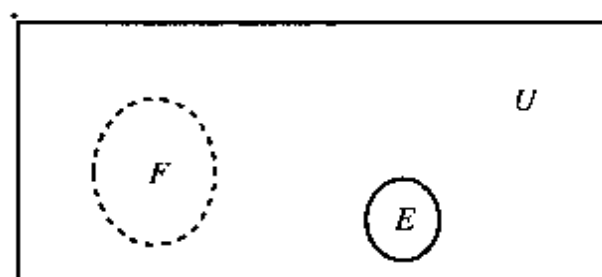


图 15.1

经典集合可看作模糊集合的特例,即隶属函数只取 0、1 两个数值的模糊集合。经典集合 E 把论域上的元素划分为界限截然分明的两部分,一部分完全属于 E ,另一部分完全不属于 E 。模糊集合 F 不能如此划分论域,只能讲元素属于 F 的程度如何。

因此,从数学上看,明晰性是元素从属于集合到不属于集合的突变性,模糊性是元素从属于集合到不属于集合的渐变性。

设有限论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, μ_i 记 u_i 对 A 的隶属度,则模糊集合 A 可以用如下方法表示

$$\mu_A(u) = \frac{\mu_1}{u_1} + \frac{\mu_2}{u_2} + \dots + \frac{\mu_n}{u_n} \quad (15.2)$$

式中的 + 号不代表加法运算,分式 $\frac{\mu_i}{u_i}$ 只表示元素 u_i 与隶属度 μ_i 是对应的。

设 U 为某班全体学生构成的论域。适当指定每个学生的隶属度,就可以确定“高个”、“健康”、“聪明”、“勤奋”等模糊集合,去描述相应的模糊概念。

取论域 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, 则

$$A = \frac{0.5}{x_1} + \frac{0.1}{x_2} + \frac{0.7}{x_3} + \frac{0.9}{x_4} + \frac{0.2}{x_5}$$

$$B = \frac{1}{x_1} + \frac{0.6}{x_2} + \frac{0.3}{x_3} + \frac{0.4}{x_4} + \frac{0.8}{x_5}$$

都是 X 上的模糊集合。

当论域为某个连续变量(如年龄、身高、距离等)的区间时,模糊集合(如年轻、年老、高个、小个、远距、近距等)须用连续变化的隶属函数表示。扎德在论域 $U = [0, 100]$ (年)上定义了模糊集合 Y (年轻)、 O (年老),隶属函数分别为

$$\mu_A(u) = \begin{cases} 1 & 0 \leq u \leq 25 \\ \left[1 + \left(\frac{u-25}{2} \right)^2 \right]^{-1} & 25 < u \leq 100 \end{cases} \quad (15.3)$$

$$\mu_O(u) = \begin{cases} 0 & 0 \leq u \leq 50 \\ \left[1 + \left(\frac{u-50}{5} \right)^{-2} \right]^{-1} & 50 < u \leq 100 \end{cases} \quad (15.4)$$

连续隶属函数可以用几何曲线表示,称为隶属曲线。图 15.2

给出年轻、中年、年老的隶属曲线。

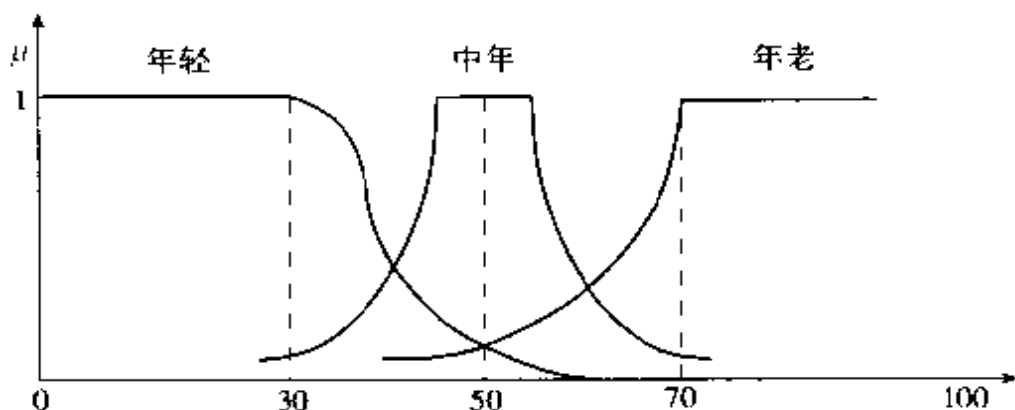


图 15.2

模糊集合反映了元素对集合隶属关系的渐变性,是刻画外延与内涵均不明确的模糊概念的适当工具。实际上,人们早已懂得用隶属度把握模糊概念,进行模糊思维,处理模糊问题。教育家用出题考试、判卷打分的办法评价学生对课程的掌握程度,就是典型。学生对课程的掌握是一个模糊概念,不能作要么掌握、要么不掌握的二值判断,合理的办法是确定每个学生的掌握程度。考试分数就是教师给考生确定的对模糊集合“掌握课程”的隶属度。在体操、跳水、歌咏等文体比赛中,评委给参赛者打分也是确定隶属度。跳水运动员的身体舒展、姿势优美、水花小等,都是模糊的判断标准,无法精确测定,只有通过比较确定他们达到标准的不同程度,才能作出较为合理的评价。

实际生活中人们很少用数值隶属度把握模糊事物,更多的是用语言隶属度划分模糊类别,如基本属于、在很大程度上属于、部分属于、不完全属于、几乎不属于等。按照扎德的模糊理论,这些语言隶属度均可像语言真值那样,用模糊集合作出定量刻画。这对模糊思维的定量描述可能是必要的,但目前的模糊理论尚未研究这个问题。

如果论域上的元素能按一定顺序排列,如 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 则 U 上的模糊集合可以不用(15.2)的表达方式,而构成一个向量

$$A = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \quad (15.5)$$

由于它的元素代表隶属度,在 0 与 1 之间取值,故称为模糊向量。用模糊向量(15.5)表示的模糊集合与用隶属函数(15.2)表示的模糊集合是等价的,但在许多情形下模糊向量更便于操作运算。为简便计,下面有时用 $A(u)$ 代替 $\mu_A(u)$ 记隶属函数,可以用模糊向量代表模糊集合。例如,前面给出的两个模糊集合可以表示为下面两个模糊向量

$$A = (0.5, 0.1, 0.7, 0.9, 0.2)$$

$$B = (1, 0.6, 0.3, 0.4, 0.8)$$

模糊集合的基本运算也是并、交、补,所用符号与经典集合相同,但含义模糊化了。

并运算 模糊集合 A 与 B 的并集仍然是模糊集合,记作 $A \cup B$,隶属函数按以下规则确定

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) \vee \mu_B(u) \quad (15.6)$$

其中, $\vee$ 表示在两个隶属度之间取大值。

交运算 模糊集合 A 与 B 的交集仍然是模糊集合,记作 $A \cap B$,隶属函数按以下规则确定

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u) \quad (15.7)$$

其中, $\wedge$ 表示在两个隶属度之间取小值。

补运算 模糊集合 A 的补集仍是模糊集合,记作 A^c ,隶属函数按以下规则确定

$$\mu_{A^c}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (15.8)$$

仍取前述两个模糊集合进行运算,有

$$\begin{aligned} A \cup B &= \frac{0.5 \vee 1}{u_1} + \frac{0.1 \vee 0.6}{u_2} + \frac{0.7 \vee 0.3}{u_3} \\ &\quad + \frac{0.9 \vee 0.4}{u_4} + \frac{0.2 \vee 0.8}{u_5} \\ &= \frac{1}{u_1} + \frac{0.6}{u_2} + \frac{0.7}{u_3} + \frac{0.9}{u_4} + \frac{0.8}{u_5} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A \cap B &= \frac{0.5 \wedge 1}{u_1} + \frac{0.1 \wedge 0.6}{u_2} + \frac{0.7 \wedge 0.3}{u_3} \\
&\quad + \frac{0.9 \wedge 0.4}{u_4} + \frac{0.2 \wedge 0.8}{u_5} \\
&= \frac{0.5}{u_1} + \frac{0.1}{u_2} + \frac{0.3}{u_3} + \frac{0.4}{u_4} + \frac{0.2}{u_5} \\
A^c &= \frac{1-0.5}{u_1} + \frac{1-0.1}{u_2} + \frac{1-0.7}{u_3} + \frac{1-0.9}{u_4} + \frac{1-0.2}{u_5} \\
&= \frac{0.5}{u_1} + \frac{0.9}{u_2} + \frac{0.3}{u_3} + \frac{0.1}{u_4} + \frac{0.8}{u_5}
\end{aligned}$$

由模糊集合的定义直接推知

$$A = B \Leftrightarrow \mu_A(u) = \mu_B(u), \forall u \in U \quad (15.9)$$

$$A \subset B \Leftrightarrow \mu_A(u) \leq \mu_B(u), \forall u \in U \quad (15.10)$$

经典集合运算满足的幂等律、交换律、结合律、分配律、对偶律、双重复原律等，对模糊集合运算仍然成立。但补余律对模糊集合不成立：

$$A \cup A^c \neq U \quad (15.11)$$

$$A \cap A^c \neq \emptyset \quad (15.12)$$

在二值逻辑中， $A \cup A^c = U$ 表示排中律， $A \cap A^c = \emptyset$ 表示矛盾律。模糊集合不满足补余律，表明它不满足排中律和矛盾律，这正是模糊性的本质表现。模糊学是以模糊逻辑为基础的。

同经典集合相比，模糊集合的运算能在一定程度上表现人脑在不同情况下灵活地处理模糊性所用的规则。鉴于模糊事物的复杂性，只用并、交、补三种运算是不够的。模糊集合论还制定了多种运算，如代数和、代数积、有界和、有界差等，可参看有关专著。

以模糊集合刻画模糊性的关键是确定隶属度。隶属度规定得合理，运算和分析才有意义。通常的做法是依据经验指定隶属度，或用模糊统计方法。前述教师出题考试打分的方法，在许多情形下都是有效的。文体比赛中，采用多个专家分别打分然后计算平

均值或总分,就是在确定隶属度。这样确定的隶属度常常因人、因时、因地而有一定差异,反映了模糊性包含一定的主观成分。

15.4 模糊关系与模糊推理

在经典集合论中,两个元素 x 和 y 要么具有关系 R , xRy ; 要么不具有关系 R , $x \not R y$; 二者必居其一且只居其一。父子关系、大于关系等是其原型。现实生活中常讲“ x 和 y 大致相等”,“甲与乙面貌相近”,“ A 比 B 高得多”,都不能用经典集合论的关系概念描述,因为它们是模糊关系。刻划一个模糊关系 R ,要紧的是确定每对元素 x, y 具有关系 R 的程度,完全具有关系 R 的用 $\mu=1$ 表示,完全不具有关系 R 的用 $\mu=0$ 表示,其余的用 $\mu \in (0, 1)$ 表示,即可给 R 以数学的刻划。可见,模糊关系是一种特殊的模糊集合。

定义 2 论域 U 到论域 V 的模糊关系 R 是直积

$$U \times V = \{ \langle u, v \rangle, u \in U, v \in V \} \quad (15.13)$$

上的一个模糊集合,用隶属函数

$$\mu_R: U \times V \rightarrow [0, 1] \quad (15.14)$$

来刻划。当 $U=V$ 时,称 R 为论域 U 上的模糊关系。

设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 从 U 到 V 的模糊关系 R 的隶属函数可用下表表示

μ	U	v_1	v_2		v_m
u_1		μ_{11}	μ_{12}		μ_{1m}
u_2		μ_{21}	μ_{22}		μ_{2m}
.....					
u_n		μ_{n1}	μ_{n2}		μ_{nm}

这个表给出的实际是一个 $n \times m$ 阶矩阵,它的元素取自 $[0, 1]$ 区

间, 代表 u_i 与 v_j 具有模糊关系 R 的程度, 因而称为模糊矩阵, 也用 R 表示

$$R = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nm} \end{pmatrix} \quad (15.15)$$

所以, 有限论域上的模糊关系是用模糊矩阵刻划的。模糊矩阵便于运算, 是刻划模糊关系的有力工具。

例 设 $U = \{u_1, u_2, u_3\}$, $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, R 就是一个从 U 到 V 的模糊矩阵

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 0.3 & 0.6 \\ 0.2 & 0 & 0.8 & 0.4 \\ 0.5 & 0.4 & 0.9 & 0.7 \end{pmatrix}$$

当 $n=1$ 时, 模糊矩阵 (15.15) 将退化为模糊向量 (15.5)。模糊向量是模糊矩阵的特殊情形。

作为直积 $U \times V$ 上的模糊集合, 可以按模糊集合的方式定义两个模糊关系的相等、包含以及模糊关系的并、交、补运算, 也可以把模糊集合的其他运算推广于模糊关系。经典集合论的关系合成运算也可以推广于模糊关系。

定义 3 设 R 是从 U 到 V 的模糊关系, S 是从 V 到 W 的模糊关系, 则 R 与 S 的合成是从 U 到 W 的模糊关系, 记 $R \circ S$, 隶属函数按以下规则确定

$$\mu_{R \circ S}(u, w) = \bigvee_{v \in V} (R(u, v) \wedge S(v, w)) \quad (15.16)$$

设 R 是 $n \times m$ 阶模糊矩阵

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (15.17)$$

S 是 $m \times p$ 阶模糊矩阵

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1p} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mp} \end{pmatrix} \quad (15.18)$$

则合成运算后得到的是 $n \times p$ 阶模糊矩阵

$$R \circ S = (\mu_{ij})_{n \times p} = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{np} \end{pmatrix} \quad (15.19)$$

其中

$$\mu_{ij} = \bigvee (r_{i1} \wedge s_{1j}, r_{i2} \wedge s_{2j}, \cdots, r_{im} \wedge s_{mj}) \quad (15.20)$$

例 设 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$, $V = \{v_1, v_2, v_3\}$, $W = \{w_1, w_2\}$, 模糊关系

$$R = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.7 & 0.2 \\ 0.5 & 0.4 & 0.6 \\ 1 & 0.6 & 0.8 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.7 \\ 0.9 & 0.5 \\ 0.4 & 0.3 \end{pmatrix}$$

则

$$R \circ S = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 \\ 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

模糊向量作为特殊的模糊关系, 可与模糊关系进行合成运算。例如, 由模糊向量 (15.5) 与模糊关系 (15.17) 合成运算, 可以得到一个 m 维模糊向量

$$R \circ S = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) \quad (15.21)$$

逻辑思维的核心是推理。适应精确方法的需要，传统逻辑只讲那种使用精确概念、精确命题和严格推理规则的推理。外延为经典集合的概念是精确概念，用精确概念塑述的命题是精确命题，用精确命题和严格的推理规则进行的推理是精确推理。但人脑的思维中大量使用的不是这种精确推理，而是由模糊概念（外延是模糊集合的概念）和模糊命题（由模糊概念构成的命题）构成的、按照模糊的或近似的推理规则进行的模糊推理。这种模糊逻辑是模糊思维和模糊方法的逻辑基础。要使模糊方法成为现代科学方法体系中的合格成员，必须给模糊概念、模糊命题和模糊推理以符合现代科学规范的表述方式。模糊集合论对此提供了目前唯一可用的工具。模糊概念和模糊命题可以用模糊集合、模糊向量、模糊关系作出某种形式化、定量化的表达。模糊关系合成运算是刻划模糊推理的适当工具。

一个模糊假言推理的例子是

$$\begin{array}{l} \text{若葡萄红了, 则葡萄熟了;} \\ \text{葡萄有点红,} \\ \hline \therefore \text{葡萄有点熟。} \end{array}$$

模糊假言推理的形式化表示为

$$\begin{array}{l} \text{若 } x \text{ 是 } A, \text{ 则 } y \text{ 是 } B; \\ \text{ } x \text{ 是 } A', \\ \hline \therefore y \text{ 是 } B' \end{array} \quad (15.22)$$

A 、 B 、 A' 、 B' 均为模糊概念，大、小前提和结论均为模糊命题， A' 与 A 是同类相近而不相同的模糊概念， B' 与 B 是同类相近而不相同的模糊概念。所以，在 (15.22) 中，小前提是对大前提前件非严格的（模糊的）肯定，结论是对后件非严格的（模糊的）肯定，表明这种推理所用的规则是不严格的、模糊的，从精确逻辑看是不合逻辑的、错误的，但为人脑思维广泛采用，人类

几千年的思维活动和交往实践证明它是有效的，若以 p 、 p' 、 q 、 q' 分别记模糊命题“ x 是 A ”“ x 是 A' ”“ y 是 B ”、“ y 是 B' ”，(15.22) 可表示为

$$p' \wedge (p \rightarrow q) = q' \quad (15.23)$$

模糊假言命题 $p \rightarrow q$ (或 $A \rightarrow B$) 实为一个模糊关系， A' 、 B' 为模糊向量。如果用模糊集合将它们定量化，上述推理可以用以下模糊关系合成运算来进行

$$A' \circ (A \rightarrow B) = B' \quad (15.24)$$

它在模糊控制、模糊诊断、模糊专家系统、模糊综合评判等方面都有重要应用。

如果一个系统的输入作用、响应方式和输出作用中有两个是模糊的，另一个也必是模糊的。这样的系统称为模糊系统，可图示如下

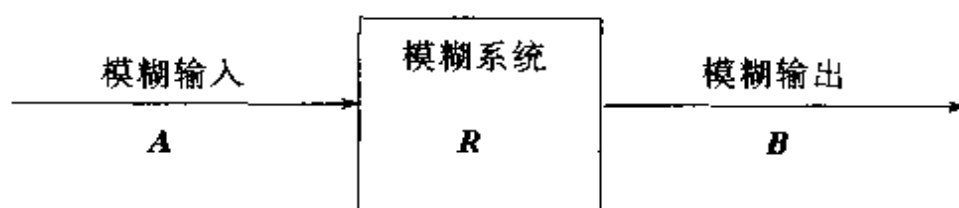


图 15.3

系统的响应方式用模糊关系刻划。若 A 、 R 、 B 中的两个已知，可按模糊关系合成运算确定另一个。以 X 记未知变元，所得合成运算称为求解模糊关系方程。分三种情况：

- (1) 已知输入和输出，求响应关系

$$A \circ X = B \quad (15.25)$$

- (2) 已知输入和响应关系，求输出

$$A \circ R = X \quad (15.26)$$

- (3) 已知响应关系和输出，求输入

$$X \circ R = B \quad (15.27)$$

由 (15.25)、(15.26)、(15.27) 求 X 的运算, 叫做解模糊关系方程, 可以描述某些模糊思维活动。

15.5 模糊截割理论

模糊学以定量化方法描述模糊性, 目的在于促使模糊性向精确性转化, 用精确性去逼近模糊性。用隶属度刻划模糊事物的类属不分明性, 模拟了人脑把握模糊概念的思维特点。但人们在处理实际的模糊问题时, 并不满足于描述这种隶属度的渐变性, 还希望对问题作出必要的明确判决, 把模糊集合转化为经典集合。截集概念是实现这种转化的适当工具。

定义 4 设 A 为论域 U 上的模糊集合, 任取 $\lambda \in [0, 1]$, λ 称为置信水平。令

$$A_\lambda = \{u \in U, \mu_A(u) \geq \lambda\} \quad (15.28)$$

则称经典集合 A_λ 为模糊集合 A 的 λ 截集。

例 设论域 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, 模糊向量 $A = \{0.4, 0.9, 0.1, 1, 0.3, 0.7\}$, 则 $A_{0.2} = \{x_1, x_2, x_4, x_5, x_6\}$, $A_{0.5} = \{x_2, x_4, x_6\}$, $A_{0.8} = \{x_2, x_4\}$ 。

一个模糊集合可以有不同置信水平的多个截集, 代表以不同的经典集合对模糊集合的不同程度的逼近。如果取一个 λ 由小到大的序列

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \cdots < \lambda_k \quad (15.29)$$

可以得到一个边界不断收缩的经典集合套

$$A_{\lambda_1} \supset A_{\lambda_2} \supset \cdots \supset A_{\lambda_k} \quad (15.30)$$

针对上例可构造一个截集嵌套序列

$$A_1 \supset A_{0.9} \supset A_{0.7} \supset A_{0.4} \supset A_{0.3} \supset A_{0.1} = X \quad (15.31)$$

利用截集概念可以对模糊集合作进一步的刻划。令

$$\text{Ker}A = A_1 = \{u \in U, \mu_A(u) = 1\} \quad (15.32)$$

$\text{Ker}A$ 称为 A 的核。令

$$\text{Supp}A = \{u \in U, \mu_A(u) > 0\} \quad (15.33)$$

$\text{Supp}A$ 称为 A 的支撑集。令

$$\text{fb}A = \text{Supp}A - \text{Ker}A \quad (15.34)$$

$\text{fb}A$ 称为 A 的模糊带，真正的模糊性就出现在这里。图 15.4 给出这三个集合的示意图。

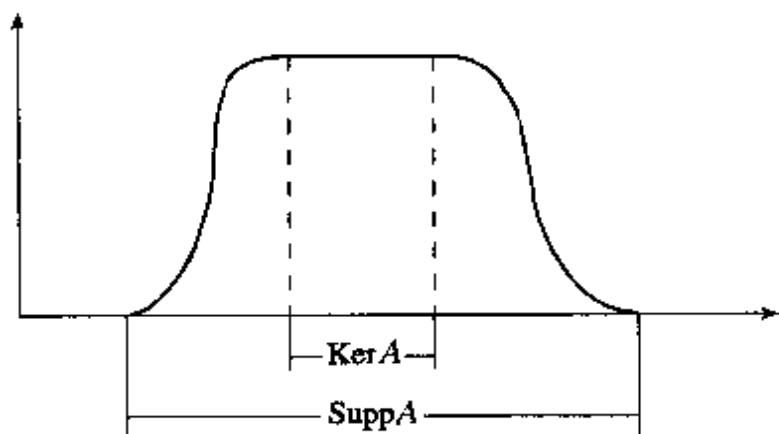


图 15.4

类似地，可以定义模糊关系的 λ 截关系，用不同置信水平的经典关系去逼近模糊关系。

利用截集概念可以对模糊事物划分档次。取定模糊集合的 λ 截集 $A_0, A_{\lambda_1}, A_{\lambda_2}, \dots, A_{\lambda_k}$ ，可以把论域上的所有对象划分为 $k+1$ 个档次： $A_0 - A_1, A_1 - A_2, \dots, A_{k-1} - A_k, A_k$ 。通常按分数段把学生划分为不及格、及格、中等、良好、优秀五个档次，用的就是这种方法。

截割概念刻划的是科学研究和日常工作中常用的截割思想。精确科学采用的是抛弃一切中介过渡信息的截割，对于中介发达的事物这样处理太粗糙。“模糊数学的截割理论是：让模糊事物不加截割地进入数学模型，充分利用中介过渡的信息，通过隶属度

的演算规则及模糊变换理论,最后在一个适当的阈值上进行截割,作出非模糊的判决。传统的数学是推演前截割,模糊数学方法则是推演后截割;传统的数学是盲目地选择阈值,模糊数学方法是浮动地选择阈值。”^①

15.6 模糊控制

按经典控制学制定控制方法,核心是建立系统的精确数学模型,通过求解、分析模型而确定用精确定量的语言表达的控制指令。对于结构复杂、机理不明的控制问题,这种方法一般无法使用。

考察扎德讨论过的停车问题。在拥挤的停车场上,为把汽车停在两辆汽车之间的空地上,若用控制学的精确方法很难奏效。司机并不建立数学模型,而是依据少量模糊信息制定模糊指令,如“再往左一点”、“再往前一点”、“稍微向右些”,就可以简便地达到控制目的。这就是实际生活中使用的模糊控制。运用模糊集合、模糊推理和模糊数学运算,总结人类进行模糊控制的经验,阐述其机理,形成相应的控制原理,就是模糊控制学。按照这种思想设计的控制器,叫做模糊控制器。

模糊控制的基本特征是绕过建立精确数学模型这一关,采用“若……,则……”式的模糊条件语句表示控制指令,简捷灵活地实施控制。如在停车问题中,司机使用“如果车偏左,则把方向盘向右转”、“如果车向右偏得太大,则把方向盘向左转得大一些”之类的指令,实行模糊控制。模糊控制所用条件语句的一般形式为

^① 沈小峰、汪培庄:《模糊数学中的哲学问题初探》,载《哲学研究》,1984(5)。

$$\text{若 } x \text{ 是 } A, \text{ 则 } y \text{ 是 } B \quad (15.35)$$

x 为输入量, y 为输出量, A 为 x 所取的模糊语言值, B 为 y 所取的模糊语言值, 可以用模糊集合或模糊向量定量地表示。根据系统特性和控制任务, 写出各种适用的模糊条件语句, 形成一套完备的控制规则, 储存在控制器中。这些控制规则刻画了系统的响应特性, 其作用相当于传递函数或状态方程, 但无须用精确的数学工具。

在系统运行过程中, 如果判明输入为“ x 是 A' ”, 从控制器中调出相应的控制规则, 即模糊条件语句 (15.35), 通过模糊推理确定控制指令。实际运作中, 这种模糊推理转化为模糊关系合成运算 (15.24), 由机器来执行。运算结果“ y 是 B' ”, 就是所需要的控制指令。实际的操作过程还须将“ y 是 B' ”进行去模糊化处理, 利用截割技术使其精确化, 得到明确肯定的控制指令, 去驱动执行环节。模糊控制的框图表示如下:

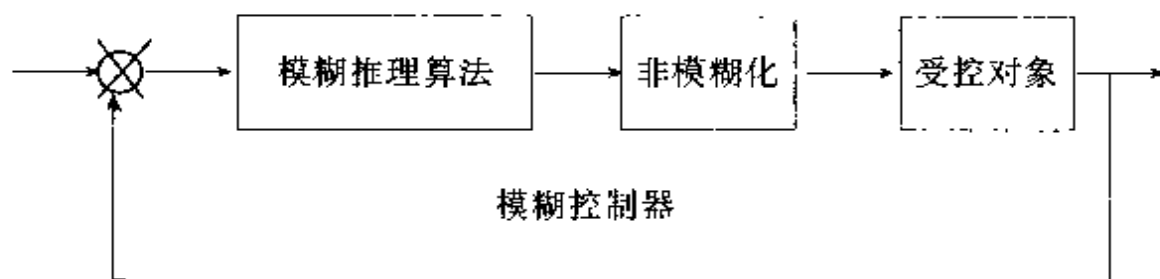


图 15.5

以水位控制为例给上述原理作些具体说明。控制任务是保持水位于标准值, 记作 0。控制量是阀门开度 u , e 为误差, 即实际水位与标准值之差。设阀门正向开代表注水, 负向开代表排水。模糊控制不着眼于给出阀门开度 u 的精确值, 也不要求精确测定误差 e 的值, 而是划分为少量模糊档次。例如, 把 e 和 u 都分为五档, 分别为正大、正小、适中 (0)、负小、负大, 都是模糊断语。控

制规则由下列模糊条件语句构成：

$$\begin{aligned} & \text{若 } e \text{ 正大, 则 } u \text{ 负大。} \\ & \text{若 } e \text{ 正小, 则 } u \text{ 负小。} \\ & \text{若 } e \text{ 为 } 0, \text{ 则 } u \text{ 为 } 0。 \\ & \text{若 } e \text{ 负小, 则 } u \text{ 正小。} \\ & \text{若 } e \text{ 负大, 则 } u \text{ 正大。} \end{aligned} \quad (15.36)$$

用适当的模糊集合描述正大、正小、0、负小和负大，用适当的模糊关系表示上述模糊条件语句，存入控制器，让机器根据受控对象实际运行状况的模糊信息作出关于误差 e 的模糊判断（在正大、正小、0、负小、负大之中选择），进行模糊关系合成运算

$$E \circ R = A \quad (15.37)$$

形成模糊指令“ u 是 A ”（ A 在正大、正小、0、负小、负大之中选择）。

可以把模糊控制分为三种类型。以上所述是逻辑型模糊控制，控制算法中的“如果”部分还可以用“且”、“或”等逻辑联结词表示。第二种是并列型模糊控制，使不同的逻辑控制共同存在于一个控制系统中，分散地对全局实行控制。第三种是模糊控制，即在条件语句的前件部分使用模糊语言变量，实现与操作者对话式控制。

模糊控制的特点是控制器结构简单，硬件易于实现，操作方便，具有一定的“智能控制”的特点，鲁棒性较好，适用于机理不明的控制问题。模糊控制是模糊理论在硬技术方面最成功的应用。但理论基础还很薄弱，控制规则建立在对模糊逻辑比较浮浅的理解上，以至于有人认为模糊控制不过是模糊逻辑似是而非的成功。模糊逻辑和模糊控制都有待理论上的突破。

15.7 模糊运筹和模糊综合评判

运筹学或更一般的事理学问题，是人的推理、智能和行为经常起作用的研究领域，广泛存在模糊性，但运筹学只注意到随机因素引起的不确定性，把模糊性误认为随机性的一种特殊表现形式，未予专门研究。模糊学区分这两种不确定性，发明了处理模糊性的数学工具，为运筹学开辟出一个新方向。

目前，在运筹学中引入模糊性的基本方式是以模糊集合取代经典集合，把运筹学的概念模糊化，提出新的运筹问题，形成新的概念、原理、方法。这种模糊化处理称为运筹学的模糊化，在运筹学的各个分支都有表现。

实际的规划问题常常用自然语言描述目标和约束条件，有明显的模糊性。例如，投资大约在 $\times\times$ 元以下，利润大约在 $\times\times$ 元以上。按照这种限定条件建立的规划论模型，是模糊数学模型。一种情形是目标函数为模糊的，要求确定它的隶属函数。另一种情形是约束条件为模糊的，反映状态空间中决策变量允许取值的范围具有不明确的边界。目标函数和约束条件都有模糊性的情形也常见。

在对策论中引入模糊观点的途径也有三个。一是把赢得函数模糊化，建立模糊赢得函数。二是把策略模糊化，得到模糊策略集。三是把二者同时模糊化。三种情形都是模糊对策，都可以用模糊数学方法处理。

在决策问题中，决策者拥有的策略和大自然的状态都可能具有模糊性。在决策问题中，随机性和模糊性往往并存，要求同时加以考虑。以模糊集合刻画策略和自然状态的模糊性，定义模糊事件的发生概率，即模糊概率，在模糊数学的基础上可以建立一套模糊决策方法。

类似地，还可以建立模糊排队论、模糊库存论、模糊更新论等。这是关于精确系统方法的直线式推广，途径明确，无需多大想像力，模糊学思想未能得到充分反映。更有前途的做法要求按照全新的思路制定模糊运筹的理论和方法。但这方面的工作还不很多。

在目前的运筹学研究中，一个较多体现模糊学精神的成果是模糊综合评判。所谓决策，是指在多种可行方案中进行选择。选择的依据是对各个方案的性能优劣作出评价。待评价的事物一般都涉及诸多因素，单因素评价意义不大，需要的是综合评价。应用模糊集合论方法对决策活动所涉及的人、物、事、方案等进行多因素、多目标的评价和判断，就是模糊综合评判。它在人才选拔、干部任命、研究成果评价等方面获得了重要应用。

评判过程是由着眼因素（对象的性能指标）和评语构成的二要素系统。着眼因素和评语一般都有模糊性，不宜用精确数学语言描述。应当用模糊集合、模糊向量、模糊关系、模糊矩阵刻划着眼因素和评语，用模糊数学运算刻划评判活动，作出带有模糊性的结论。设着眼因素集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，评语集为 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ ，均为有限集。首先就各个着眼因素分别进行评价，将其结果汇集表示为一个矩阵 R ，称为单因素评判矩阵，代表从 X 到 Y 的一个模糊关系。不同着眼因素 x_i 对于作出最后评价的重要性不同，正确的综合评判依赖于合理确定各因素的权重。令 A 记刻划各着眼因素权重的模糊向量。模糊综合评判的数学模型归结为以下模糊关系合成运算

$$A \circ R = B \quad (15.38)$$

其中， B 是论域 Y 上的一个 m 维模糊向量（集合），代表评判作出的最后结论，称为综合评判向量。

解综合评判问题包括三个步骤。第一，对论域 X 中给出的 n 个着眼因素分别作出单因素评判，得到 n 个 m 维单因素评判向

量, 构成一个 $n \times m$ 维模糊矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。第二, 确定权重模糊集合 A , 权重系数一般是依据专家经验给定的。第三, 进行关系合成运算 $A \circ R$, 求得综合评判向量 B , 代表 Y 上的一个模糊判断“ y 是 B ”。

例 考虑一个消费者对商品 (衣服) 的评判问题。因素集为 $U = \{\text{款式, 面料, 耐度, 流行性, 价格}\}$, 评语集 $V = \{\text{很受欢迎, 欢迎, 一般, 不欢迎}\}$ 。通过市场调查, 对五种因素分别评价, 得到五个 4 维的单因素评判向量, 形成单因素评判矩阵

$$R = \begin{pmatrix} 0.35 & 0.24 & 0.13 & 0.28 \\ 0.55 & 0.33 & 0.10 & 0.02 \\ 0.70 & 0.12 & 0.08 & 0.10 \\ 0.41 & 0.27 & 0.23 & 0.09 \\ 0.60 & 0.22 & 0.18 & 0 \end{pmatrix}$$

根据消费者对各因素的偏好程度, 确定权重为

$$A = (0.40, 0.25, 0.14, 0.21, 0.30)$$

作模糊关系合成运算以求综合评判向量

$$\begin{aligned} A \circ R &= \begin{pmatrix} 0.40 \\ 0.25 \\ 0.14 \\ 0.21 \\ 0.30 \end{pmatrix}^{-1} \circ \begin{pmatrix} 0.35 & 0.25 & 0.13 & 0.28 \\ 0.55 & 0.33 & 0.10 & 0.02 \\ 0.70 & 0.12 & 0.08 & 0.10 \\ 0.41 & 0.27 & 0.23 & 0.09 \\ 0.60 & 0.22 & 0.18 & 0 \end{pmatrix} \\ &= (0.35, 0.25, 0.21, 0.28) \end{aligned}$$

这就是所要的综合评判向量。经过适当处理, 可以得出最后结论。

以上所述是模糊综合评判的正问题。如果已知代表综合评判结果的模糊向量 B , 可以反求权重向量 A , 这种运算称为综合评判的逆问题, 在数学上归结为解模糊关系方程

$$X \circ R = B \quad (15.39)$$

优化的综合评判往往源于专家根据经验确定的权重, 但他们

自己常常说不清楚。解综合评判的逆问题，有助于总结专家的经验。

15.8 模糊聚类分析

分类是确定同质对象、区分异质对象的思维活动。概念的建立，判断的形成，规律的发现和阐述，都以关于对象的合理分类为前提。传统的分类建立在等价关系概念上。论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 上的等价关系 R 满足以下要求：(1) 自反性： xRx ， X 中的每个元素与自己有关系 R ；(2) 对称性： $xRy \Rightarrow yRx$ （若 x 与 y 有关系 R ，则 y 与 x 有关系 R ）；(3) 传递性： xRy 且 $yRz \Rightarrow xRz$ （若 x 与 y 有关系 R 且 y 与 z 有关系 R ，则 x 与 z 也有关系 R ）。给定关系 R ， X 中任何两个元素要么等价，要么不等价，因而按照 R 可以把所有元素分为若干等价类。这是一种精确的分类。

现实世界的事物类别大都是模糊的，应按照模糊学原理划分。依据论域上的模糊等价关系对论域中的对象进行分类，称为模糊聚类分析，可看作传统分类方法的推广。实际操作分两个步骤。(1) 把待分类的对象全体作为论域 X ，建立从 X 到自身的模糊等价关系（矩阵）。实际得到的模糊关系往往不是等价的，而是模糊相似关系（不具有传递性）。用平均方法求得相似关系的传递闭包，可以得到模糊等价关系 $R = (r_{ij})$ ，以 R 作为分类标准。(2) 取 R 的 λ 截关系 R_λ ， R_λ 为严格等价关系，据之按经典方法进行分类。令 $R_\lambda = (r'_{ij})$ ，

$$\begin{aligned} r'_{ij} &= 1 & r_{ij} &\geq \lambda \\ r'_{ij} &= 0 & r_{ij} &< \lambda \end{aligned} \quad (15.40)$$

R_λ 是一个以 0 和 1 为元素的普通矩阵。把 R_λ 中元素相同的各行归为一类，就得到关于论域 X 中所有元素的分类。选定一个不同聚类水平 λ 序列，得到截关系序列 $R_{\lambda_1}, R_{\lambda_2}, \dots, R_{\lambda_k}$ ，按这个序列

顺序进行聚类，就会得到一个由细变粗、逐步归并的聚类图。按经典方法分类，得到的是类别之间界限分明的分类。按模糊聚类分析分类，得到的是动态的软分类，能够提供关于对象在不同聚类水平下不同隶属关系的全面信息，适用于缺乏明确分类标准的复杂问题。

15.9 模糊模式识别

人在认识某种客观事物之后，有关该事物基本特征的信息将存储于大脑中，形成所谓模式或标准样本。实践经验越丰富，头脑中存储的模式也越丰富多样。在以后的实践后，每当出现认识对象时，人就把它同头脑中存储的样本进行比较，给对象以分类。这种思维活动叫做模式识别。

人脑存储的模式大多具有模糊性，即模式是用一些模糊特征表示的。人脑是根据事物的模糊特征、运用模糊思维辨认和确定事物的模式的。根据模糊学的原理和方法刻划人脑进行模式识别的机理，称为模糊模式识别。基本方法有两种，一是基于最大隶属度原则的直接方法，二是基于择近原则的间接方法。

直接方法要解决的问题是，待识别的对象明晰确定，模式类型有模糊性，用模糊集合描述模式类型，识别任务是判明给定的对象优先属于哪个类型，或者哪个对象优先属于给定的模型。其中又分两种情形。

最大隶属度原则 I 给定论域上的一个模糊模式，以模糊集合 A 表示，论域中有 n 个待识别对象 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。问题是确定哪个对象优先属于 A 。答案为

若

$$\mu_A(x_i) = \max_{1 \leq j \leq n} \mu_A(x_j) \quad (15.41)$$

则优先将 x_i 归于 A 。即将 n 个对象中那些对 A 具有最大隶属度的

对象优先归属于模式 A 。

最大隶属度原则 II 给定论域 X 上的 n 个模式, 分别用模糊集合 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 表示。 $x \in X$ 为识别对象。问题是确定 x 优先归属哪个模式。答案为

若

$$\mu_{A_i}(x) = \max_{1 \leq j \leq n} \mu_{A_j}(x) \quad (15.42)$$

则 x 优先归属于 A_i 。即对象 x 对哪个模糊集合的隶属度最大, 就将它优先归属于该模糊集合代表的模式。

间接方法处理的问题是, 不但模式类型有模糊性, 被识别的对象也有模糊性, 都需要用模糊集合描述。模式识别在数学上归结为衡量两个模糊集合的接近程度, 按接近程度确定对象的归属。常用的数学概念是贴近度和择近原则。贴近度是模糊数学的重要概念, 刻画两个模糊集合的接近程度。模糊集合 A 与 B 的贴近度记作 $\rho(A, B)$ 。贴近度有不同的定义, 需要根据具体问题具体选择。择近原则也分两种情形。

择近原则 I 给定论域上的一个模糊集合 A , 代表一个模糊模式, 论域中的 n 个识别对象分别用模糊集合 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 表示。问题是确定哪个对象优先属于 A 。答案为

若

$$\rho(A, B_i) = \max_{1 \leq j \leq n} \rho(A, B_j) \quad (15.43)$$

则把 B_i 优先归属于 A 。

择近原则 II 给定论域上的 m 个模糊集合 $A_1, A_2, \dots, A_m$, 代表 m 个模糊模式, 被识别对象用模糊集合 B 表示。问题是确定 B 应优先归属于哪个模式。答案为

若

$$\rho(A_i, B) = \max_{1 \leq j \leq m} \rho(A_j, B) \quad (15.44)$$

则把 B 优先归属于 A_i 。

最大隶属度原则和择近原则都不是现有数学方法简单平移到模糊情形的结果，而是以模糊集合为工具对人脑模糊模式识别方式的摹写，即对模糊思维的摹写。这为我们发展模糊方法提供了有益的启示。

思 考 题

1. 区别随机性、模糊性、歧义性、灰色性等概念。
2. 试述精确方法的要点及其局限性。
3. 什么叫模糊方法？为什么应该把模糊性当作模糊性来处理？
4. 试析人脑在识别、推理、预测、决策中的模糊性。您自己有哪些体会？
5. 试析中国传统文化中的模糊思维，并从模糊性角度比较东西方在思维方式上的异同。

阅 读 书 目

1. 苗东升：《模糊学导引》，北京，中国人民大学出版社，1987。
2. 《如何处理现实世界中的不精确性——L. A. Zadeh 教授访问记》，载《模糊数学》，1984（4）。
3. 寺野寿郎：《模糊工程学》，沈阳，辽宁大学出版社，1991。
4. 汪培庄：《模糊集与随机集落影》，第1章，北京，北京师范大学出版社，1985。
5. 苗东升：《模糊数学方法》，载《方法论全书（Ⅲ）》，南京，南京大学出版社，1995。

第 16 章 系统工程

16.1 组织管理的技术

作为人类知识总体系的一部分，系统工程不是理论，不是学术，而是一种工程技术，直接应用于改造客观世界的实践活动，应用于解决实际问题，强调的是实用性。与传统的土木工程、冶金技术等“物理”工程技术不同，系统工程是“事理”工程技术，即人们办事的技术。传统工程是硬技术，即关于设计、制造、操作使用物质工具和机器的技术；系统工程是软技术，即组织管理各种社会活动的方法、步骤、程序的总和。建设一个新系统，改造一个既有系统，经营一个已建成的系统，都需要组织管理的技术，即系统工程。如钱学森所说：“‘系统工程’是组织‘系统’的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有‘系统’都具有普遍意义的科学方法”^①。即使简单的小系统，如处理个人日常事务，系统工程的思想方法也是有用的，但只有涉及多人多因素的大型复杂事务的组织管理问题，才能充分体现系统工程方法的必要性和优越性。愈是大型复杂的组织管理活动，愈能体现系统工程的科学性和重要性。

系统工程有别于传统工程的另一特点是强调用系统观点处理工程问题，属于系统科学的工程技术。系统工程要求它的使用者

^① 钱学森：《论系统工程》，增订本，12 页。

自觉地把工程对象看作系统。从共时性角度看，要把对象看作由部分组成的整体，注重了解各部分之间的相互联系，从系统整体出发处理问题。从历时性角度看，要把工程问题看作由许多相互关联的阶段、步骤、工序等组成的过程，注重把握全过程，从全过程出发关照好各阶段的衔接。系统工程工作者关心的主要不是用什么材料和模具、如何切割加工、如何组装等硬技术问题，而是事理系统的构成要素、结构方式、整体目标、约束条件、系统与环境的关系等组织管理问题，是总体协调、目标优化之类问题。系统观点不仅表现在强调对象的系统性，还在于强调所用方法的系统性，系统概念被置于这种工程技术的中心位置。因此，从前者出发，应把系统工程定义为处理系统问题的工程技术；从后者出发，应把系统工程定义为用系统观点和方法处理工程问题的技术。

16.2 部门系统工程

人类社会生活的各个领域都有组织管理问题，都需要应用科学方法。系统工程是有关这种科学方法的共性的知识。任何实际问题的解决都不能仅仅运用这种共性的知识。教育活动的组织管理离不开教育学知识，需要把教育学与系统工程结合起来。军事活动的组织管理离不开军事学知识，需要把军事学与系统工程结合起来。社会生活的每个领域都有自己的特殊科学理论，系统工程只有同这种特殊科学理论结合起来，才能解决那里的问题。这是系统工程方法论的一个重要观点。所有系统工程工作者都承认这一点，但直到 80 年代初才由钱学森给予明确而系统的阐述。

这样理解的系统工程不是一门知识，而是包括许多门工程技术的一大类工程技术，每一门系统工程都是一个专业。整个系统工程横跨了自然科学、数学、社会科学等，发展系统工程需要各

方面的科学技术工作者合作。钱学森曾给出系统工程的下述分类：

系统工程的专业	专业的特有科学基础
工程系统工程	工程设计
科研系统工程	科学学
企业系统工程	生产力经济学
信息系统工程	信息学、情报学
军事系统工程	军事科学
经济系统工程	政治经济学
环境系统工程	环境科学
教育系统工程	教育学
社会系统工程	社会学、未来学
计量系统工程	计量学
标准系统工程	标准学
农业系统工程	农事学
行政系统工程	行政学
法治系统工程	法学

上表给出的并非系统工程的完备分类。“在现代这样一个高度组织起来的社会里，复杂的系统几乎是无所不在的，任何一种社会活动都会形成一个系统，这个系统的组织建立、有效运转就成为一项系统工程。同类的系统多了，这种系统工程就成为一门系统工程的专业。”^① 毋庸置疑，这种分类不属于严格的系统科学的分类。但对于推广应用系统工程是必要的。

除系统科学本身的问题，任何其他问题都不可能只用系统方法、系统工程去解决，都需要把系统方法、系统工程与该问题所属的特殊学科结合起来。

^① 钱学森等：《论系统工程》，增订本，180页，

16.3 系统工程方法论

系统工程的方法论，从哲学上说，就是辩证法，要求辩证地分析和解决组织管理所涉及的各种矛盾；从科学上说，就是系统科学的方法论，要求按照系统思想、观点和方法分析和处理组织管理所涉及的各种问题。但作为工程技术层次的系统科学，系统工程还应有其独特的方法论。

任何系统工程的实施都是一个过程。系统不是囿囿整体，具有相对的可分性。作为过程系统的系统工程，必定具有某种共同的内容、步骤、程序、方法。应用系统工程解决问题必须遵循一定的工作步骤和共同的规则。古德和麦克雷尔写的第一本《系统工程》(1957)已对系统工程的一般内容、步骤和方法作了总结。60年代是系统工程方法论探索取得丰硕成果的时期，其中尤以霍尔的三维结构最为成功。霍尔通过对系统工程的一般阶段、步骤和常用知识范围的考察，以时间、逻辑、知识作为坐标，提出如图16.1所示的3维结构，称为霍尔结构。霍尔结构得到广泛的推广应用，被视为各种系统工程的方法论基础。

在霍尔结构中，时间维表示系统工程从开始到结束的基本过程，由七个阶段组成，各阶段顺序衔接，完成前一阶段才可能进行后一阶段。

- (1) 规划阶段：通过调查研究，论证任务的必要性和可行性，制定系统工程的规划；
- (2) 拟定方案阶段：提出具体的研制方案和计划；
- (3) 研制阶段：实施研制方案，制定生产计划；
- (4) 生产阶段：生产系统所需的零部件，提出安装方案；
- (5) 安装阶段：根据设计方案把零部件组装成完整的系统，作出系统运行计划；

(6) 运行阶段：使系统投入实际运行，在运行中检验其性能，作必要的改进；

(7) 更新阶段：在系统经过长期运行而老化后，用新系统取而代之，或对旧系统进行改装。

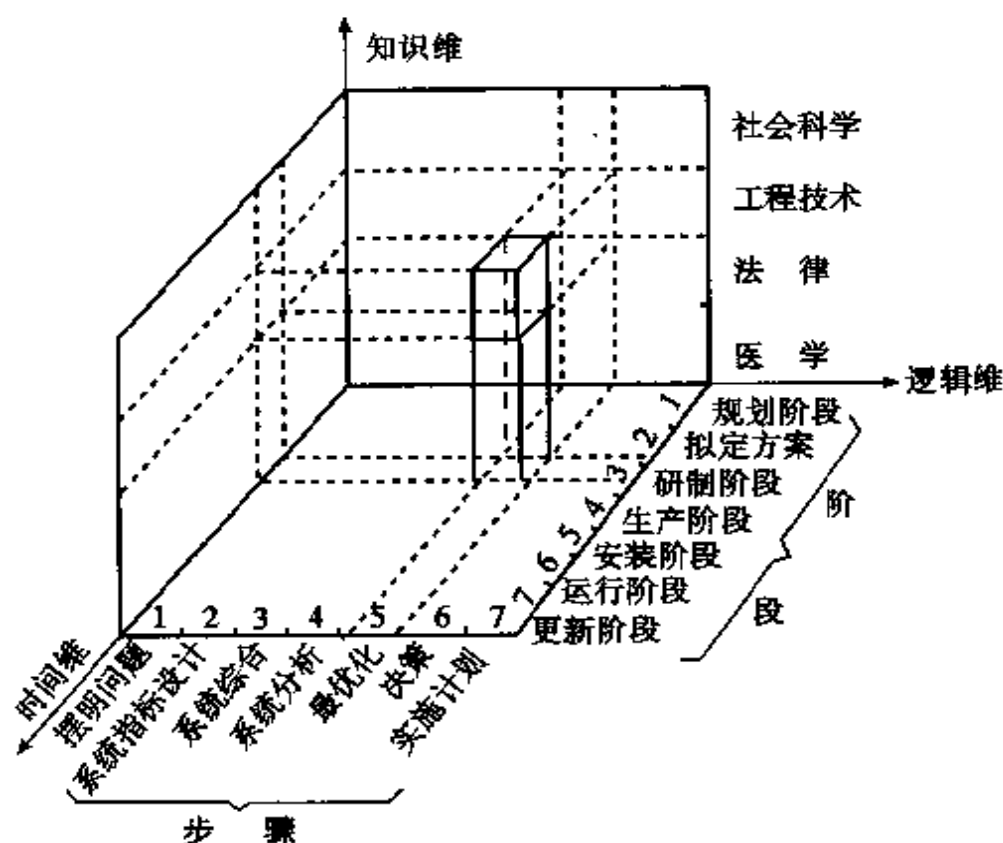


图 16.1

以上七个阶段的划分和命名显然是以工程系统工程为背景总结出来的，但原则上适用于其他系统，不过需要对一些术语（如安装）作广义的解释。

在复杂的大系统问题中，上述每个阶段又是一种复杂的事理过程，霍尔结构的逻辑维指出这些阶段应采取的七个共同步骤。

(1) 摆明问题：全面收集有关任务的历史、现状、发展趋势的数据资料，做到对问题心中有数；

(2) 确定系统指标：根据任务要求提出必须达到的目标（包

括各种技术目标、经济目标、政治目标、社会目标等)，确定效果衡量指标；

(3) 系统综合：收集能够达到预定要求的各种技术方案、政策、控制手段和每个方案的实施方法、衡量标准，通过比较，排出优劣次序；

(4) 系统分析：给各个待选方案建立数学模型，分析比较其优劣；

(5) 系统选择：从所有方案中选择最佳方案；

(6) 决策：在复杂系统工程中，系统选择阶段得到的最佳方案可能不止一个，须作出最后的选择；

(7) 实施计划：把选定的方案付诸实施，并对前六个步骤作必要的修正，为进入下一阶段作准备。

时间维是系统工程实施过程框架结构的划分，逻辑维是精细结构的划分，知识维则指示完成上述阶段和步骤所需要的知识和技术素养。把各个逻辑步骤和阶段综合起来，形成所谓系统工程活动矩阵，如图 16.2 所示，是系统分析设计的有效武器。

逻辑维 时间维	1 摆明 问题	2 选定 指标	3 系统 综合	4 系统 分析	5 系统 选择	6 作出 决策	7 实施 计划
1. 制定规划	a_{11}	a_{12}				a_{16}	a_{17}
2. 拟定方案	a_{21}						
3. 研 制							a_{37}
4. 生 产				a_{44}			
5. 安 装							
6. 运 行	a_{61}						
7. 更 新	a_{71}	a_{72}				a_{76}	a_{77}

图 16.2

16.4 工程计划的统筹方法

作为一种应用于工程实践的技术，系统工程已发展出许多有用的方法。本节介绍一种最常用的技术，即工程实践中安排时间的方法，通常称为关键路径法和计划评审技术。由于它的理论基础是网络分析，又称为网络计划。它们很好地体现了系统思想和方法的优越性。对其他方法感兴趣的读者可从有关著作中寻找。

关键路径法的作用是产生一张使工程计划达到优化的时间进度表。大体分为三步。

(1) 用箭头网络图表示整个工程任务。首先是把工程划分为各个活动或工序。每个工程任务都可以分为若干子任务，一级子任务再分为若干二级子任务，一直分到可用一个箭头表示的最简单的活动。网络图中的结点代表一个事项，一个事项表示一个或几个活动的开始或结束，一项活动的开始点是箭尾事项，结束点是箭头事项。网络图中的弧表示一项活动。一个活动用一个箭头表示，箭头指向工程前进的方向，不许用同一个箭头事项和箭尾事项表示两项活动。在把每个活动加入网络时，要确定该活动开始前必须完成哪些活动，哪些活动必须跟在该活动之后，哪些活动必须和该活动同时进行。划分活动的工作结束后，应估计各项活动所需时间，标在代表它的弧下面。然后画出箭头图。

例 设某工程由 10 项活动 A、B、C、E，…，K 组成，试编制满足以下关系的箭头图。

- 1) 工程的第一批活动 A 和 B 可以同时开始。
- 2) A 和 B 在 E 之前。
- 3) B 在 C、F、G 之前。
- 4) C 和 F 在 H、I、K 之前。
- 5) E 在 J、K 之前。

- 6) H 和 G 在 J 之前。
- 7) H 在 K 之前。
- 8) I、J、K 是工程活动的结束。

要正确地表示所有活动之间的关系，需引入虚活动（不花费时间或资源的活动）概念。在这个例子中，工序 A、B 必须在工序 E 之前进行，工序 C 之前只有工序 B。如用图 16.3 (a) 表示，就会把 A 误当作必须在 C 之前完成。若像图 16.3 (b) 那样，引入虚活动 D，即可避免这种错误。

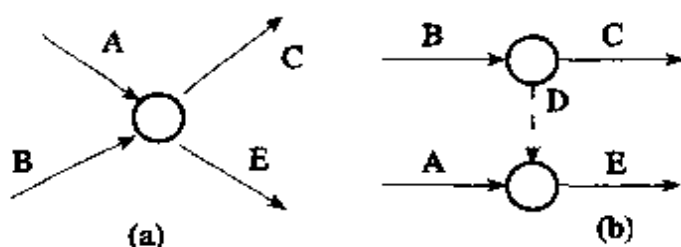


图 16.3

按照上述规则，引入虚活动 D_1 、 D_2 、 D_3 ，得到所需的箭头图如下：

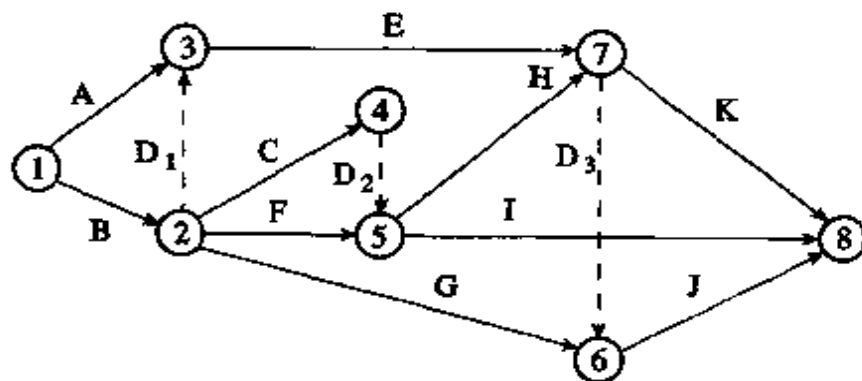


图 16.4

(2) 关键路线的计算。在一项工程的网络图中，从开始到结束跨越网络而又相互连接的活动构成一条链，称为一条路线。同一个网络图中有许多条路线，各需花费一定的时间，其中完成各

个活动所需时间最长的路线称为关键路线，组成关键路线的活动称为关键活动。画箭头图是第一步，第二步是计算各条路线的时间，区分关键的与非关键的。非关键活动的特点是，它的最早开始日期和最迟完工日期之间的时间多于它的实际时间，即有机动时间。关键活动没有机动时间。编制网络计划就是在一个庞大的网络图中找出关键路线，标明工程的所有关键活动。科学的工程管理要求把注意力集中到关键路线的工作状况上，优先安排人力物力、尽量缩短关键路线的时间。这是抓主要矛盾的哲学思想在工程管理中的具体应用，因而关键路线又称为主要矛盾线。

计划的网络模型使计划也可以做模拟试验，即把可供选择的各种方案放入网络模型中作计算模拟。绘制网络图、计算网络时间和确定关键路线，得到的计划方案一般还是初始的，不是最优的。还需要进行网络优化处理，包括时间优化、时间-资源优化和时间-费用优化，找出最优计划方案。

(3) 编制工程进度表。时间安排的最终目标是给出一张时间表，标明每项活动的起止时间，与工程中其他活动的关系，哪些是关键活动，哪些是非关键活动，计算非关键活动的机动时间总数，以便执行者应用。

在上述方法中，网络计划中的各事项及活动之间的关系、对每项活动的时间估计都假定是确定型的。但实际工程管理中这些因素并非确定型的，而是随机的，需要引入概率方法。由此提出了图解评审技术，用随机网络的方法描述和评价系统。

16.5 实施系统工程系统—— 总体设计部

关于建立总体设计部的论述是钱学森系统工程思想的重要组成部分。它是钱学森在领导中国航天事业的实践中形成的。80年

代,在把他的航天系统工程思想向其他领域全面推广的过程中,钱学森进一步发展了这个思想,提出在各种社会系统中建立总体设计部、特别是建立国民经济建设的总体设计部、总体设计部体系等新观点。90年代,在研究开放的复杂巨系统理论的过程中,这个思想又有新的重要发展。近年来,马宾、于景元等对总体设计部问题作了专题论述(见《系统研究》一书)。

什么是总体设计部 总体设计部是它所属社会系统的一个子系统,它不是系统的决策领导机构,而是决策机构领导下的咨询机构、决策支持单位,只能向决策者提出建议、预测,不能代替决策。它也不是系统的决策的执行管理机构,不对决策成败负责,只负责及时发现问题、提出解决问题的总体方案的咨询意见。三者的关系可用下图表示^①:

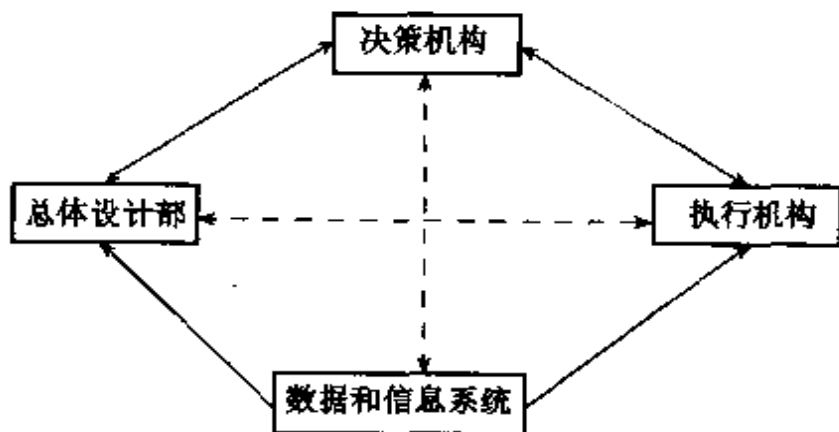


图 16.5

总体设计部的设计和组建 总体设计部是按系统原理设计和组建的:(1)由熟悉系统各方面专业知识的专门人才组成,由知识面比较广的专家领导,以便通过专家们的集体讨论和思想交锋把各种专业知识综合起来,产生系统的整体突现效应——形成能

^① 于景元:《从工程系统总体设计部到系统总体设计部体系》,载许国志主编:《系统研究——祝贺钱学森同志85寿辰论文集》,133页。

够把握系统全局的新知识、新思想；(2) 在母系统的不同层次的子系统建立各自的总体设计部，形成总体设计部体系即系统，按照层次系统的原理运转，发挥其系统功能；(3) 总体设计部成员、特别是负责领导的专家应熟悉系统科学，自觉运用系统原理和方法工作。

总体设计部的任务 总体设计部设计的是系统的整体，是系统的总体方案和实现整个系统的技术途径，它的工作是进行总体分析、总体论证、总体设计、总体规划、总体协调。总体设计部一般不承担具体部件的设计，但对决定整个系统命运的关键部门要抓住、抓紧。总体设计部主要是做系统整体运行的可行性研究，同时也做“不可行性研究”，在做方案优化时，同时做“次优化和非优化”。

总体设计部的工作方法 总体设计部的全部活动都要自觉地全面地贯彻执行系统思想和系统方法，特别是运用开放的复杂巨系统理论。(1) 总体设计部把系统作为它所从属的更大系统的组成部分开展研究，对它的所有技术要求首先从实现这个更大系统的技术协调的观点来考虑。(2) 总体设计部把系统作为若干分系统有机结合成的整体来设计和管理，从实现整个系统技术协调的观点来考虑对分系统的技术要求。(3) 对研制过程中分系统与分系统、分系统与整系统之间的矛盾，总体设计部坚持从整个系统一盘棋、局部服从整体的原则加以协调处理，选择解决方案，然后要求各分系统或分总体设计部去研究实施。(4) 总体设计部不能只凭经验定性地分析决策，必须遵循现代科学的原则，运用定性和定量相结合的方法，建立数学模型，在计算机上做模拟仿真试验，得出定量数据。(5) 总体设计部的工作建立在充分而可信的数据资料的基础上，要建立自己的自动化的数据库，要与更大系统的、国家的、甚至国际的数据库和信息系统联系起来，以保证获得一切必要的、准确的、及时的数据资料。

总体设计部的概念代表了一种现代化的科学原理、管理原则、组织形式和工作方法。如马宾所指出的：“总体设计部目前在世界上以不同的形式和名称存在，已形成一个学科和产业。”^① 搞好我国的物质文明建设、精神文明建设、政治文明建设都需要运用总体设计部的工作方法，真正把系统工程应用于各行各业。

16.6 综合集成工程

10.7 节讨论了方法论层次上的综合集成，本节讨论工程技术层次的综合集成，即复杂巨系统工程。这是钱学森系统工程思想新的重大发展。

为什么综合集成 综合集成的必要性：大量社会问题表现为开放的复杂巨系统，没有现成的理论指导，无法像简单系统或简单巨系统那样作严格的理论描述并得出精确的定量结论。必须另觅途径，放弃传统的处理方法，采用定性与定量相结合的综合集成方法。综合集成的可能性：现代科学分门别类地发展而形成的庞大学科体系，对人们要解决的社会各种开放的复杂巨系统问题就不同方面或部分作出描述，积累了大量科学知识；实践着的人们、特别是各行各业的专家积累了丰富的经验、实际感受等，是关于对象系统的重要知识。这两种知识为解决开放的复杂巨系统问题提供了认识上的可能性。问题在于如何把这一切利用起来，获得关于开放的复杂巨系统整体的理性认识。

对什么综合集成 这里讲的是知识领域或思想领域的综合集成，通过综合集成要产生的是新知识、新思想、新方法。(1) 人类是靠自己掌握的知识解决各种问题的。一种是科学理论知识，这种知识是分门别类的，但任何一个开放的复杂巨系统问题都涉及

^① 许国志主编：《系统研究——祝贺钱学森同志 85 寿辰论文集》，109 页。

许多学科的知识。另一类是经验的知识、不成文的实际感受或直感式的判断,它们分散地储存于不同社会领域中实践着的人们、特别是各领域专家们的头脑中,这种知识可以反映各个局部或片断的真理,不能反映全局的规律。其中许多知识是知其然而不知其所以然,有些甚至连专家自己也没有意识到,只有当实际问题的具体情景呈现于专家面前时,方能“触景生情”式地从他的潜意识中引发出来。这些知识对于解决开放的复杂巨系统问题是不可或缺的,有时还是关键性的。需要运用综合集成法创造适当的“情景”把潜藏于专家头脑中的那些实际的感受、直感式的判断挖掘出来,把他们的零散经验集中起来,给以加工改造,进一步把所有这一切与各门理论中的有关知识综合集成起来,形成关于开放的复杂巨系统整体运行的理性认识。(2) 处理社会巨系统问题同样需要获得关于系统整体的状态、特性、行为的定量描述。专家的知识不仅不完全,而且一般都是定性的,必须把定性认识与定量认识结合起来,把专家知识与有关的统计数据结合起来,才能解决问题。这就是综合集成各种局部的定性认识,达到整体的定量认识,以求得可信的结论。(3) 现代社会极其复杂,单靠人脑的智能已不可能全面认识和解决特殊复杂巨系统问题。以电子计算机为基础的各种专家系统和智能机器可以代替人脑的部分功能,以人脑不可比拟的快速性和精确性处理和存取信息,还可以创造新知识。综合集成意味着把人脑与电脑结合起来,使二者相互支持、相互补充、相互促进,甚至融为一体,以便形成更强的智能,创造更多、更新的知识。

总之,综合集成的实质是把专家群体、统计数据和各种信息、计算机三者有机地结合起来,把各种理论知识和人的经验结合起来,把定性知识和定量知识结合起来,使这些因素形成一个有机的系统,发挥这个系统的整体优势和综合优势,实现集智慧之大成。我国实行的是人民代表大会制。人大代表、政协委员都是活

跃在各条战线的专家，他们的提案、建议是不同群众实践经验的结晶；还有通过各种渠道收集到的广大群众的意见和建议。这些都是对于管理国家十分有用的知识，又都有局限性。把这些“零金碎玉”变为关于国家建设的路线、方针、政策、战略等“大器”，也需要综合集成。

如何搞综合集成 综合集成工程具有很强的可操作性。运用综合集成工程处理社会巨系统问题的基本步骤和要点是：

(1) 一个实际问题提出来后，研究主持人（或研究小组）首先要充分收集有关的信息资料，调用有关方面的统计数据，作为开展研究工作的基础性准备。这些数据资料中包含系统定性、定量特性的信息，没有它们就不可能实现从关于系统的局部定性认识经过综合集成达到关于系统的整体定量认识。

(2) 研究主持者约请各方面有关专家对系统的状态、特性、运行机制等共同进行分析研究，明确问题的症结所在，对系统的可能行为走向及解决问题的途径作出定性判断，形成经验性假设，明确系统的状态变量、环境变量、控制变量和输出变量，确定系统建模思想。

(3) 以经验性假设为前提，充分运用现有的理论知识，把系统的结构、功能、行为、特性、输入输出关系定量地表示出来，作为系统的数学模型，以便用模型研究代替对实际系统的研究。

(4) 依据数学模型把有关的数据、信息输入计算机，对系统行为做仿真模拟试验，通过数值试验，获得关于系统特性和行为走向的定量数据资料。

(5) 组织专家群体对计算机仿真试验的结果进行分析评价，对系统模型的有效性进行检验，以便进一步挖掘和收集专家的经验、直感、更深入细致的判断。所谓“即景生情”式的见解，常常是专家面对仿真试验结果时被诱导出来和明确起来的。如果再应用虚拟现实技术，可能会有意想不到的效果。

(6) 依据专家们的新见解、新判断,对系统模型作出修改,调整有关参数,然后再上机做仿真模拟试验,将新的试验结果再交给专家群体分析评价,根据新一轮的专家意见和判断再次修改模型,再做仿真试验,再请专家群体分析评价,如此反复循环,直到计算机仿真试验结果与专家意见基本吻合为止。最后得到的数学模型就是符合实际系统的理论描述,从这种模型中得出的结论是可信的。

谁来搞综合集成 运用综合集成工程对社会巨系统问题进行分析、预测和决策研究,不可能由某个人或某些人的简单群体承担,必须采用现代化的组织形式,这就是总体设计部或总体设计部体系。它依托用最先进的计算机等高技术武装起来的综合集成研讨厅体系,给实行民主集中制原则提供了现代化的组织形式和规范化的操作方法,是实现决策民主化和科学化的重要保证。

还有两点需要指出:第一,为获得关于系统整体的定量认识,综合集成法也依赖于建立数学模型。综合集成工程尚未提出自己的独特建模技术,目前通行的各种建模技术均可采用。但综合集成法对建模的方法论思想有重要贡献,强调模型必须建立在经验和对系统的实际理解上,摒弃一味追求模型逻辑性和精确性而忽视其经验意义的做法,主张求助于经验,把定性和定量结合起来,最后定量。第二,运用综合集成法解决问题是一个反复实践、反复认识的过程,不可能经过一次或几个步骤就得到对系统全局的定量认识。能否运用好综合集成法,要看能否坚持《实践论》的哲学观点。

思 考 题

1. 怎样划清系统工程与运筹学的学科界限?
2. 为什么说系统工程是组织管理的技术?

3. 概述钱学森系统工程思想的要点。

阅 读 书 目

1. 钱学森等：《论系统工程》，增订本，7~86、158~172 页。
2. 苗东升：《系统科学原理》，第 2 章。
3. 三浦武雄、浜田尊：《现代系统工程学概论》，第 1、2、3 章，北京，中国社会科学出版社，1983。

主要参考书目

①钱学森等. 论系统工程. 增订本. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988

②钱学森, 宋健. 工程控制论. 修订版. 北京: 科学出版社, 1983

③许国志主编. 系统研究——祝贺钱学森同志 85 寿辰论文集. 杭州: 浙江教育出版社, 1996

④王寿云, 于景元, 戴汝为, 汪成为, 钱学敏, 涂元季. 开放的复杂巨系统. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1996

⑤J. M. Thompson, H. B. Stenmit. Nonlinear Dynamics and Chaos: Geometrical Methods for Engineers and Scientists. John Wiley and Sons Ltd., 1986

⑥Stepven H. Strogatz. Nonlinear dynamics and Chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering. Addison-Wesley Publishing Company, 1994

⑦Hermann Haken. Advanced Synergetics—Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1983

⑧C. G. Langton. ed Artificial Life. New York: Addison-Wesley, 1989

⑨C. G. Langton etc. (ed) Artificial Life II New York: Addison-Wesley, 1992

⑩沃德罗普. 复杂——走在秩序与混沌边缘. 台湾: 天下文化出版公司, 1994; 北京: 三联书店, 1997

后 记

自 1979 年末调到中国人民大学从教起，我一直有个愿望：能像其他同仁那样，出版一本自己写的教材。起先，我讲授的是微积分、模糊数学和离散数学。80 年代后半期以来，给文科本科生讲简明系统科学，后来给文科硕士生讲系统科学及其哲学问题，1994 年起给文科博士生讲系统科学和系统思维。积十多年的体会，形成这个书稿。现在，在研究生院和出版社的支持下，本书得以作为硕士研究生公共教材出版，算是圆了我的一个小小的梦。

系统科学在很大程度上是依托自然科学和数学发展起来的，大量应用自然科学成果和数学工具是其显著特点。考虑到讲授对象主要是文科学子，其自然科学特别是数学知识一般较差，我的指导思想是针对文科特点，力求联系实际，以形象的语言多讲系统思想、概念和方法，尽量少用数学工具，不用形式化语言，不讲证明，不讲具体建模技术。另一方面，不可变成哲学课程，必要的数理内容不能去掉，要学生硬着头皮接受一些数理知识和科学思维方法，这对他们的长远发展是有好处的。同时，要保持系统科学的学科完整性，并希望能对理工科学生也有参考价值。本书就是总结多年来我按照这个指导思想而实践的体会写成的。

本书也不是单纯作为教材而写的。拙著《系统科学原理》出版以来，系统科学又有很大发展。近年来，我一直在关注这方面的进展，学习国内外学者的新成果，同时自己也在做些研究。本书是这些年来我自己学习和研究的总结，基本指导方针还是钱学森系统科学体系的思想，按三个层次组织内容。《原理》从建立系统学出发，分别介绍各种系统理论，讨论它们对系统学的贡献，但

这些系统理论本身大多不能简单地划归系统科学。本书不宜再采用这种写法，而应限于完全属于系统科学的那些内容。《原理》出版时，钱学森刚刚提出开放的复杂巨系统概念，书中因而未予反映。莫名在书评中指出这个缺点。^①接受他的批评，本书对这一理论进展作了简要阐述。近年来，钱学森对系统科学体系提出一些新观点，本书力求按照自己的理解体现出来。

钱学森系统科学体系思想的核心是建立系统学。这是中国系统科学界十几年来极为关心的大问题。系统学一书至今未能写出来，表明它的难度相当之大。钱学森及其合作者一直在以相当大的精力探讨这一课题，其最新成果总结在《开放的复杂巨系统》一书中。此书出版是中国系统科学在90年代的重要进展。书中反映了他们对系统学的许多新认识，例如明确了系统学主要是关于复杂巨系统的理论，从定性到定量综合集成法是系统学的主干，应采取从繁到简的路子，先建立开放的复杂巨系统理论，再作为特例引出其他系统理论。^②同80年代的论述比，这是很大的进展。但《开放的复杂巨系统》一书还不完全是系统学著作，他们下一步有何大动作，学界正翘首以待。还有些学者也在作这方面的探讨。谭跃进等人的《系统学原理》（1996）就是一个有益的尝试。

十多年来，我始终关注着建立系统学的问题，形成一些想法。今天来看，基本上还是钱先生80年代的思路，主要限于简单巨系统学。有鉴于此，本书虽然以钱学森系统科学体系思想为指导，但没有一章以系统学为标题。不过，在我的思想中是把第3至10章的主要内容划归系统学范围的。这部分的逻辑结构还不是我所设想的系统学框架，许多内容要进入系统学尚须提炼，但自以为对

① 莫名：《中国学派的系统科学》，载《光明日报》，1993-03-05。

② 见钱学森1996年6月2日致于景元的信，载王寿云等：《开放的复杂巨系统》，杭州，浙江科学技术出版社，1996。

读者了解系统学还有些帮助。倘若能对其他学者建立系统学有所参考，便是额外的收获了。

根据钱学森的新见解，我们在技术科学层次中把运筹学与事理学分开阐述，但工程技术层次的自动化技术和信息技术分别作为一节放在控制学和信息学中。钱学森的系统科学体系中未给模糊系统理论留下专门的位置，但它属于系统科学当无大问题。根据我在人大多年讲授的经验，学生对这部分很欢迎，故在本书中予以保留，并仍采用模糊学的名称。在系统科学界有相当影响的系统动力学和灰色系统理论也应归属技术科学层次，限于篇幅，本书没有专门介绍。

占有资料对于写这类书的意义，人所共知。钱学敏教授两次让我阅读钱老关于系统学的书信的打印本（后发表于《开放的复杂巨系统》一书），于景元教授在得到沃德罗普《复杂》一书（台湾中译本）不久便借我复印，他们帮助我尽早了解到国内外科学大家的思想动向。上海理工大学车宏安教授也提供过许多信息，并阅读了本书大部分未定稿，提出珍贵的意见。几年来，宏安兄不嫌弃我这个孤子，给予许多安慰、鼓励和帮助。我把李白名诗《独坐敬亭山》改了四个字送他（诗题也有所变动），以表达孤子深深的情思：

孤念车宏安

众鸟高飞尽，孤云独弋闲。
相看两不厌，只有车宏安。

苗东升 1997年9月1日于泊静斋